Ueber das Problem des Entladungsrohres für sehr hohe Spannungen

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde

genehmigt von der

Philosophischen Fakultät der

Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin

von

Kurt Lenz

aus Berlin

Tag der mündlichen Prüfung: 29. November 1934

Tag der Promotion: 8. Februar 1935

1934

Druck: Triltsch & Huther, Berlin

133

Referenten: Prof. Dr. Wehnelt

Prof. Dr. von Laue

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Ueber das Problem des Entladungsrohres für sehr hohe Spannungen.

Auf verschiedenen Gebieten der Wissenschaft und Technik wird heute versucht, mit immer höheren Spannungen an Vakuumgefäßen zu arbeiten. Von besonderem Interesse sind die Versuche, sehr schnelle Korpuskularteilchen zur Kernumwandlung zu erzeugen und die Bestrebungen, Röntgen- und Kathodenstrahlen größerer Durchdringungsfähigkeit zu erhalten, wie sie zu medizinischen und Materialuntersuchungszwecken gebraucht werden. Bei technischen Entladungsröhren für die höchsten heute gebräuchlichen Spannungen sind die physikalischen Vorgänge noch recht wenig geklärt, so daß deren Herstellung mit unübersichtlichen Schwierigkeiten zu kämpfen hat und ihr Arbeiten im Betrieb noch nicht in jeder Hinsicht sicher und gleichmäßig ist. Um auf diesem Gebiet weiterzukommen und ein klares und umfassendes Bild von den Vorgängen im Innern der Röhre beim Anlegen hoher Spannung zu erhalten, wurde diese Arbeit begonnen im Anschluß an die Versuche von A. Brasch und F. Lange.

Bau eines großen Stoßgenerators.

Die im Folgenden behandelten Arbeiten wurden im Röntgenlaboratorium der Osram-Röhrenfabrik ausgeführt. Es bestand hier die Absicht, Röntgenröhren für höhere Spannungen als damals gebräuchlich zu entwickeln. Eine Anlage für 600 kV stand im Bau. Diese war besonders auf den Betrieb von strahlungsgekühlten Röntgenröhren für 600 kV zugeschnitten. Die beiden Pole haben entgegengesetzt 300 kV pulsierende Gleichspannung gegen Erde (Villard-Schaltung, Fig. 1).

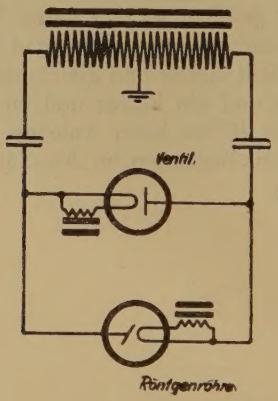

Fig. 1
Schema der Villard-Schaltung. Bei der 600 kV-Apparatur liegen jedoch 2 bis 4 Ventile in Serie.

Diese Anlage wurde vielfach auch für meine Versuche und Beobachtungen benutzt. Besonders geeignet schien eine Stoßanlage. Einmal gelingt damit bekanntlich die Herstellung sehr hoher Spannungen mit verhältnismäßig kleinen Mitteln und vor allem in kleineren Räumen als bei gleich hoher Gleichspannung, dann aber hat die Untersuchung mit Stoßspannung gewisse Vorzüge, die in der Kürze der Belastungszeit liegen. Es bestand auch die Hoffnung, mit Stoßspannung höhere Potentialdifferenzen an den Röhren zu erreichen. Die Versuche, die den Wandeffekt, wie im letzten Teil beschrieben wird, rein zu beobachten gestatten, wären wohl ohne Anwendung von Stoßspannung in den zur Verfügung stehenden Räumen kaum möglich gewesen. Es wurde daher von mir begonnen, eine Anlage zu bauen, die bei einer Spannung von mindestens einer Million Volt für die Untersuchung von Röhren geeignet sein sollte. Gleichzeitig bestand dabei die Absicht, einer eventuellen technischen Weiterentwicklung für den Betrieb von Röntgen-

röhren mit Stoßspannung vorzuarbeiten. Dabei wurde besonders an die Möglichkeit gedacht, Stoßanlagen unter Oel evtl. unter Miteinbau der Röntgenröhren zu konstruieren, die hohe Spannung auf äußerst kleinem Raum zu verwenden gestatten würde. Die zur Aufladung der Kondensatoren in der Stoßanlage dienende Gleichstromanlage wurde so universell ausgebildet, daß damit die Erzeugung von 340 kV pulsierender oder konstanter Gleichspannung sowie von Wechselspannung von 300 kVs 50 ~ möglich ist, auch bei Erdung eines Pols.

Leider stand nur ein Raum von 3,80 m Höhe zur Verfügung, der zudem durch Pfeiler in Abständen von 4 m unterteilt war. Das eigentliche Problem bestand dabei nicht im Erreichen der Spannungshöhe an sich, sondern darin, die Anlage in diesem engen Raum unterzubringen,

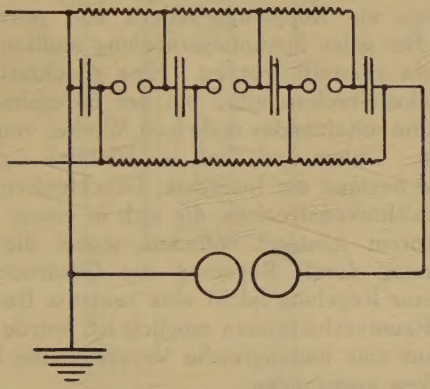

Fig. 2

Schema der Marx'schen Schaltung. Bei + und — wird der Ladegleichstrom zugeführt. Zwischen den kleinen Kugeln, in den Schaltfunkstrecken, springen Funken über, die die Kondensatoren in Serie schalten. An den großen Kugeln tritt dann die Summationsspannung auf.

der sich von den für solche Zwecke sonst üblichen großen Hallen sehr ungünstig unterscheidet. Es wurde die Marx'sche Schaltung zur Spannungsvervielfachung durch Serienschaltung von Kondensatoren gewählt (Schaltbild Fig. 2). Nach den damaligen Erfahrungen sollte die Anzahl der Stöße 1/sec. betragen. Um trotzdem eine genügende mittlere Röntgenstrahlausbeute erzielen zu können, mußte die Kapazität groß gewählt werden. Die Kapazität der in Serie liegenden Kondensatoren betrug 3000 cm. Die 7 Stufen bestanden aus je 2 Kondensatoren von je 10 500 cm Kapazität. Da der Raum so knapp war, wurden nach vielen Ueberlegungen Hartpapierkondensatoren der Firma Jaroslaw verwendet, die aus je 2 ineinandergeschachtelten Einzelgliedern von je 21 000 Zentimeter bestanden, so ergab sich die beste Raumausnutzung. Das Gewicht betrug pro Stück 175 kg, also für 1 Stufe 350 kg, die Länge

2,40 m. Bei einer Ladespannung von 200 kV war eine Maximalspannung von 1,4 Millionen Volt zu erwarten. Es war von vornherein zu befürchten, daß schon bei niedrigerer Spannung Ueberschläge auftreten würden, die eine weitere Steigerung in diesem Raum nicht zulassen würden. Um genügend lange Gleitwege bei der Isolation der hohen Spannung zu erzielen, wurde ein neuartiger Aufbau gewählt. Die Kondensatoren wurden an präparierten Seilen aufgehängt unter Zwischenfügung kleiner Porzellanisolatoren, die ein Sprühen an den Berührungsstellen mit spannungführenden Metallteilen verhindern sollten, da sonst die Seile verkohlt und vielleicht entzündet werden können. So wurde für die letzte Stufe fast 4 m Isolationsweg ermöglicht; nur die ersten beiden Stufen wurden stehend auf Hartpapierstützern angeordnet.

Zuerst wurde die Anlage versuchsweise in Betrieb genommen mit Wasserwiderständen als Kopplungsgliedern und provisorischen Luftfunkenstrecken. Bei jeder Spannungsregelung mußten dabei alle Funkenstrecken einzeln verstellt werden. Eine gleichzeitige zentrale Betätigung aller Funkenstrecken wäre bei der unregelmäßigen Lage der einzelnen Stufen, die miteinander mehrfach Winkel von 90 Grad bilden, schwierig gewesen. Daher und auch im Hinblick auf die erwähnten Anlagen unter Oel bestand ein Interesse, Druckfunkenstrecken zu entwickeln, d. h. Schaltfunkenstrecken, die sich in einem isolierenden Gehäuse bei konstantem Abstand befinden, wobei die Aenderung der Ueberschlagsspannung durch Regelung des Gasdrucks vorgenommen wird. Da mit dieser Regelung leicht eine zentrale Bedienung auch bei kompliziertesten Raumverhältnissen möglich ist, wurde mittels des provisorischen Aufbaus eine umfangreiche Versuchsreihe begonnen, solche Druckfunkenstrecken auszubilden.

Die Funkenstrecken in der Marx'schen Schaltung haben bekanntlich die Aufgabe, die Serienschaltung der Kondensatoren zu vollziehen in dem Augenblick, in dem die Ladespannung die gewünschte Höhe erreicht hat. Um möglichst reproduzierbare Verhältnisse zu erhalten und die Ladespannung zu messen, wurde e i n e der Funkenstrecken mit besonderer Präzision hierzu hergerichtet. Diese „Zündfunkenstrecke" wurde außerdem so dimensioniert, daß sie als erste ansprach und die anderen dann auslöste. Ihre Ablesung dient auf Grund einer Eichkurve zur Bestimmung der gesamten Spannung. Dieser Schaltmechanismus arbeitet einwandfrei bei langsamer Stoßfolge, wenn alle Funkenstrecken aus genügend großen Kugeln bestehen, in freier Luft. Der Abstand der einzelnen Kugeln darf bis etwa zum Doppelten des Abstandes der Zündfunkenstrecke betragen. Werden Druckfunkenstrecken verwendet, so treten folgende Fehler auf. Die Zündspannung ist nicht konstant, sie schwankt bei den einzelnen Funkenstrecken in ganz unregelmäßiger Weise. Es ist gar nicht möglich, eine als Zündfunkenstrecke zu bestimmen, es zündet jedesmal eine andere Funkenstrecke zuerst. Die Spannung und auch die Stoßzahl/sec. schwankt um einen Mittelwert, der sich ebenfalls mit der Zeit stark ändert. Ferner tritt

häufig in geschlossenen Gefäßen keine genügende Entionisation nach dem Stromstoß ein, so daß der Funke nicht wieder abreißt und ein Lichtbogen stehenbleibt, über den der Ladestrom kontinuierlich abfließt.

Anfangs gelang es überhaupt nicht, in den kleinen Druckgefäßen die hohe Spannung zu halten. Es wurden 2 Stahlkugeln von 15 mm ∅

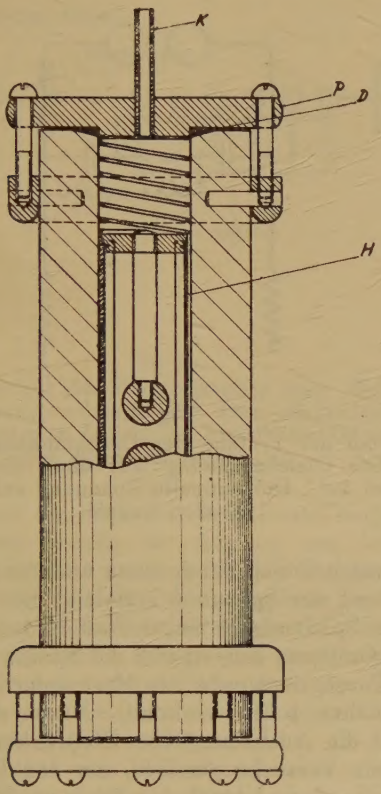

Fig. 3

Ansicht, teilweise Schnitt, der zuerst gebauten Druckfunkenstrecken. Die Kugeln hatten 6 mm ∅, der Innendurchmesser des Gehäuses war 30 mm. Die endgültige verwendeten Druckgefäße haben eine lichte Weite von 110 mm, die Kugeln 30 mm ∅, bei ganz ähnlichem Aufbau.

verwendet, sie befanden sich in einem Hartpapierrohr von 30 mm lichter Weite. Die erste Druckfunkenstrecke zeigt Fig. 3. Die Kugeln waren mit den metallischen Abschlußplatten P verbunden, die durch Schrauben und konische Gummidichtung D den Gasraum abschlossen. Durch eine Kupferkapillare K stand der Innenraum in Verbindung mit einem Manometer und konnte mit Stickstoff gefüllt werden. Der Ab-

stand der Kugeln, der durch ein geschlitztes dünnes Hartpapierrohr H festgehalten wurde, betrug anfangs 6 mm. Da der Druck bis 30 Atm. gesteigert werden konnte, hätte eine Spannung von 200 kV ausgehalten werden müssen. Die Anordnung wurde zunächst geprüft als Schaltglied zwischen 2 Kondensatoren (Fig. 4). Schon bei verhältnismäßig

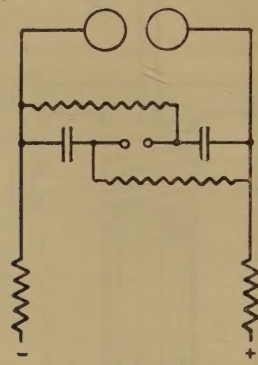

Fig. 4
Schema der bei der Prüfung der Druckfunkenstrecken benutzten Schaltung. Die Gleichspannung lädt über die Widerstände die Kondensatoren auf. Die doppelte Spannung entlädt sich über die großen Kugeln.

niedriger Spannung ließ sich durch keine noch so große Druckerhöhung mehr eine Erhöhung der Spannung erzielen. Die Zündung erfolgte bei immer niedrigerer Spannung, je länger Funken durch das Rohr gegangen waren. Bei der Oeffnung zeigten sich die Spuren vieler Gleitfunken an den Wänden. Durch sie wurde das Hartpapierrohr, das den Abstand der Kugeln festhalten sollte, verkohlt. Durch die Längsstruktur des Hartpapiers wird die Ausbildung von Gleitfunken sehr befördert. Es wurden dann viele Versuche gemacht, um den Funkenraum ein Hüllrohr zu ziehen, das dem Angriff der Funken widersteht. Keramische Materialien wurden jedoch stets durch die vom Funken ausgehende Druckwelle zersprengt. Jedes organische Material wurde schließlich verkohlt. Es blieb nicht anderes übrig, als den Innendurchmesser des Gehäuses so weit zu vergrößern, daß keine Ueberschläge von den Kugeln zur Wand mehr stattfinden. Es wurde aber nicht eine Spannungsfestigkeit von 200 kV erreicht.

Versuche wurden darauf angestellt, eine besondere Kugelfunkenstrecke in Luft zur Zündung zu verwenden und für die übrigen Schaltglieder Druckfunkenstrecken, die durch einen Schaltstoß gezündet werden, aber die volle Gleichspannung sicher vertragen. Eine Aenderung des Druckes sollte dabei, wenn möglich, etnbehrlich gemacht werden. Das sollte dadurch erreicht werden, daß die einzelne aus 2 Kugeln be-

stehende Funkenstrecke aufgeteilt wurde in eine Reihe in Serie geschalteter kleinerer in einem gemeinsamen Gehäuse. Es sollte dann die von der Zündfunkenstrecke ausgehende Wanderwelle die einzelnen Abstände der Reihe nach überspringen. Das Schema für diesen Vorgang zeigt Fig. 5. Die von der Zündfunkenstrecke herkommende Sprung-

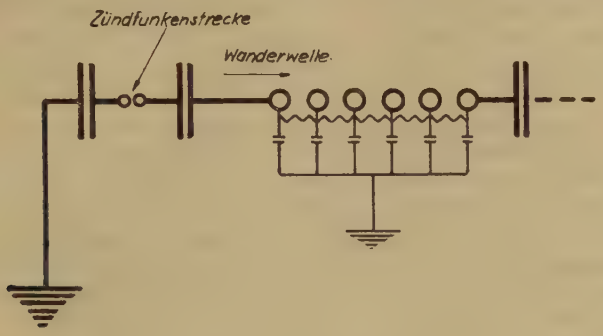

Fig. 5
Schema zur Erläuterung der Wirkungsweise einer Mehrfachfunkenstrecke bei Stoßbeanspruchung. Die dünn ausgezogenen Kondensatoren und Widerstände deuten die Eigenkapazität und Ableitung der einzelnen Kugeln an.

welle lädt nacheinander die Kapazität der kleinen Kugeln auf die volle Spannung auf, nachdem jeweils der Abstand von der vorigen übersprungen ist; die folgende hat dann noch das Ruhepotential. Für langsame Spannungsänderung verteilt sich die gesamte Spannung durch die stets vorhandenen Ueberbrückungswiderstände gleichmäßig auf alle Abstände, so daß kein Durchschlag erfolgt. Es wurden bis 18 kleine Kugeln bzw. Zylinder mit abgerundeten Enden in einem Gefäß verwendet. Diese Serienfunkenstrecken hielten aber nicht die volle Gleichspannung aus, da sich dieselbe nicht gleichmäßig verteilte. Es gab ein ständiges unregelmäßiges Ansprechen von Teilfunkenstrecken, die dann die übrigen zündeten. Bei kleinerer Anzahl macht sich die Ungleichförmigkeit weniger bemerkbar. Bei 3 Kugeln mit 2 Abständen war beinahe ein zufriedenstellender Betrieb zu erreichen, jedoch war der Vorteil gegen 2 Kugeln nicht bedeutend; es mußte dabei schon der Druck reguliert werden.

Es wurden dann wieder einfache Funkenstrecken benutzt und der Innendurchmesser erheblich vergrößert, der Kugeldurchmesser auf 30 mm erhöht und entsprechend der Druck verringert auf 8 Atm. max. Dabei wurde gefunden, daß der Gleitweg an der Innenseite der Hartpapierzylinder sich keineswegs proportional zum Druck verkleinert, er beträgt bei 200 kV mindestens 10 cm. Bei einem Abstand der Kugeln von 20—30 mm war es nun möglich, 240 kV an der Druckfunkenstrecke aufrecht zu erhalten. Es treten jedoch die anfangs erwähnten allge-

meinen Mängel von Druckfunkenstrecken auf, die sich nicht beheben lassen. Um überhaupt einen Betrieb mit einer definierten Spannung zu ermöglichen, wird als Zündfunkenstrecke eine Kugelfunkenstrecke bei Atmosphärendruck in einem weiten Hartpapiergehäuse verwendet. Der Abstand wird durch einen Motor verändert und durch Widerstände und Voltmeter fernabgelesen. Um Lichtbogenbildung zu vermeiden, wird zwischen die Kugeln, die aus Nickel bestehen und 15 cm Durchmesser haben, ein Preßluftstrom geblasen. Diese Einrichtung arbeitet in gewissen Grenzen mit genügender Gleichmäßigkeit. Es kommt aber immer von Zeit zu Zeit vor, daß die Druckfunkenstrecken auf einen Zündstoß der Zündfunkenstrecke nicht ansprechen, so daß ein oder mehrere Stöße ausbleiben. Wird der Druck etwas ermäßigt, so zünden einzelne Druckfunkenstrecken, bevor die richtige Zündspannung an der Zündfunkenstrecke erreicht ist, sodaß Stöße kleinerer Spannung und in schnellerer Folge auftreten. Ist der Druck zu niedrig oder geschieht die Aufladung zu rasch, so bilden sich an den Druckfunkenstrecken Lichtbögen, die nicht wieder abreißen. Da der Druck stets in allen Funkenstrecken derselbe ist, so läßt sich nicht vermeiden, daß zeitweise einzelne Funkenstrecken in einem Zustand sind, der sie gar nicht ansprechen läßt, andere dagegen in einem solchen, daß sie bereits bei zu niedriger Spannung zünden.

Um zu prüfen, ob diese Unregelmäßigkeit auf unreproduzierbaren Wandladungen an der Innenseite der Hartpapierzylinder beruht, wurde der Raum um die Kugeln mit einem Metallnetz umgeben, das mit einem Pol verbunden war. Obwohl so die Feldstärke eindeutig festliegen muß, zeigte sich keine merkliche Aenderung der Arbeitsweise, auch dann nicht, wenn der Abstand der 30 mm-Kugeln nur 5 mm betrug. Da dann die Feldstärke an den Kugelpolen kaum noch durch äußere Felder beeinflußt werden kann, ist also anzunehmen, daß andere Einflüsse, die nicht mit der Wand zusammenhängen, die Genauigkeit des Ansprechens verringern. Es wäre denkbar, daß bei der hohen Feldstärke Elektronen aus dem Metall gezogen werden zumal, da durch die vorhergehenden Funken eine unkrontrollierbare Aufrauhung und chemische Veränderung der Oberfläche herbeigeführt wird. Eine weitere Störungsquelle sind die Restionen und geladenen Staubteilchen, die in den geschlossenen Gefäßen nicht aus dem gefährlichen Bereich entfernt werden können. Die Versuche zeigen also, daß wenigstens für eine Anlage, bei der eine genau reproduzierbare Einstellung von Spannung und Stoßzahl möglich sein soll, eine Verwendung von Druckfunkenstrecken nicht zu empfehlen ist, solange die gezeigten Mängel nicht beseitigt werden können.

Für unsere Zwecke genügten die Druckfunkenstrecken als Schaltglieder. Zuletzt wurden auch die anfangs verwendeten Wasserwiderstände ersetzt. Als Kopplungsglieder werden Drosseln benutzt, die einen solchen Widerstand haben, daß sie der Bedingung genügen

$$R^2 > \frac{4\,L}{C}$$

Falls diese Ungleichung nicht erfüllt ist, klingt die Spannung nicht aperiodisch ab, sondern in Form gedämpfter Schwingungen, was zu Störungen Anlaß gibt und für die Röhren gefährlich ist. Die Induktivität wurde eingeführt, um das Absinken der Spannung durch die Ladewiderstände zu verzögern. Dies hat besondere Bedeutung zur Untersuchung von Röhren, bei denen eine Entladung erst einige Zeit nach dem Anlegen der Spannung einsetzt. In Fig. 6 ist A der Spannungs-

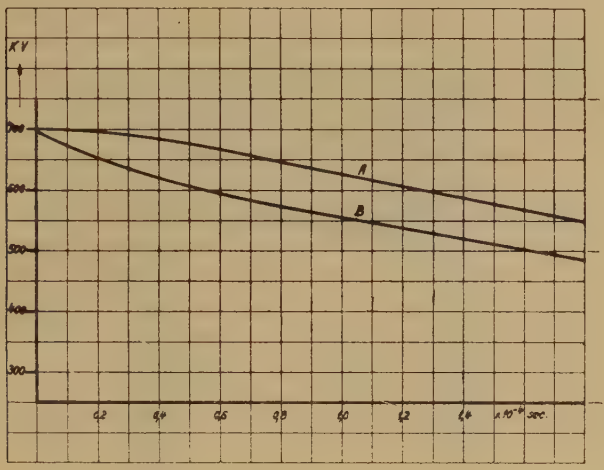

Fig. 6
Spannungsverlauf an der großen Stoßanlage, A mit den verwendeten Drosseln, B ohne Induktivität.

verlauf mit Induktivität, B mit rein Ohm'schen Ladewiderständen. Einen schnelleren Abfall kann man stets wieder erreichen durch Parallelschalten eines Widerstandes zur gesamten Anlage. Die Drosseln wurden aus Konstantandraht gewickelt. Fig. 7 zeigt ihren inneren Aufbau. Jede Drossel ist aus 10 scheibenförmigen Spulen zusammengesetzt, die in einem knapp bemessenen Oelbehälter aus Hartpapier angeordnet sind. Jede der kleinen Spulen war fähig, mehr als 100 000 Volt Stoßspannung auszuhalten unter Oel, wie vorher durch Versuche ermittelt wurde. Die Drosseln mit Behälter und mit Oelfüllung waren leicht genug, um in die Spannung führenden Leitungen, dünnwandige Messingrohre, freitragend eingefügt zu werden.

Da auch die Druckfunkenstrecken einfach an den Kondensatoren befestigt wurden, wird also die gesamte Anlage allein von den isolierenden Seilen getragen. Als Druckzuleitung für die Funkenstrecken dienen lange Zellonröhren. Die Druckregelung und Druckmessung wie auch die Ablesung und Einstellung der Zündfunckenstrecke wird zusammen mit der Bedienung und Kontrolle der Ladeapparatur von 230 kV von

einem gemeinsamen Schalttisch aus vorgenommen. Zur Messung der hohen Spannung wurde eine große Kugelfunkenstrecke gebaut. Die Kugeln aus Kupfer haben 1 m ∅ und werden von Hartpapierstützern getragen, die sich auf je einem eisernen Untergestell befinden. Wegen der geringen Raumhöhe mußten alle Teile so flach wie möglich ausgeführt werden. Die Gestelle mit den Kugeln laufen auf Rädern auf in den Boden eingelassenen Schienen.

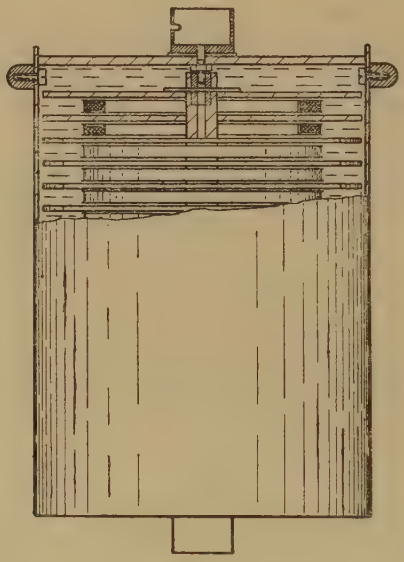

Fig. 7

Schnittbild einer Drossel. Die einzelnen kleinen Spulen werden durch Hartpapierstreifen getrennt und durch einen Hartpapierbolzen zusammengehalten.

Aus der maximal gemessenen Schlagweite von 95 cm errechnet sich eine Spannung von 1,4 Millionen Volt. Die Genauigkeit der Messung ist bei dieser Spannungshöhe schon sehr gering, da die Abstände der geerdeten Pfeiler, der Decke und des Bodens so klein sind, daß ein Einfluß auf die Schlagweite nicht zu vermeiden ist. Es können aber Vergleichsmessungen mit großer Genauigkeit ausgeführt werden. Bei Spannungen bis etwa 700 000 Volt ist mit dieser Einrichtung auch eine genügend genaue absolute Spannungsmessung möglich. Es fragt sich nun, ob die aus der Schlagweite errechnete Spannung tatsächlich an der Entladungsröhre wirksam ist. An der Röhre kommt die Spannung zur Wirkung, auf die die Kapazität der gesamten Anlage nach beendeter Schaltung aufgeladen ist. Diese ist stets kleiner als die Spannungs-

summe der Einzelkondensatoren. Wenn C_S die Serienkapazität, C_V die Ersatzkapazität für die Verlustkapazitäten gegen Erde, n die Anzahl der Stufen, so ist die Maximalspannung

$$n \cdot E \cdot \frac{C_S}{C_S + C_V}$$

Dies ist die Nutzspannung der Anlage. Tritt nun noch eine zusätzliche Ueberspannung auf, die in einem kleinen Bruchteil der Zeit, in der die Energie der Kondensatoren sich entlädt, an die Röhre gelangt, so wird durch sie keine merkliche Kathodenstrahlenenergie erzeugt im Verhältnis zu der durch die niedrigere lang dauernde Spannung erzeugten. Diese Ueberspannung ist also nutzlos, ja sogar schädlich, wenn durch ihre Höhe die Röhre gefährdet wird.

Das Vorhandensein solcher Ueberspannungen zeigt sich schon dadurch an, daß man vielfach eine höhere Gesamtspannung als die Summe der Einzelspannungen erhält. Wie vorher gesagt wurde, ist die wirkliche Nutzspannung aber stets kleiner. An einer kleineren Stoßanlage, die von mir für besondere Versuche mit Entladungsröhren gebaut wurde, konnten die verschiedenen Verlustkapazitäten in den einzelnen Stufen gemessen und rechnerisch zu einer Gesamtverlustkapazität vereinigt werden. Da die Kapazität dieser Anlage 450 cm, die Zahl der Stufen 8 war, war der Effekt der Ueberspannung ziemlich deutlich. Die Tabelle zeigt bei verschiedenen Abständen f der Zündfunkenstrecke die er-

Tabelle I

f	kVn	kVs	Ueberspg. in %
2.0	202	280	40
3.0	285	390	37
4.0	360	500	39

rechnete Spannung kV_n, die gemessene kV_s und die prozentuale Ueberspannung. Da nun keine Energiequelle vorhanden ist, aus der heraus eine zusätzliche Aufladung der ganzen Kapazität der Anlage auf die Ueberspannung denkbar ist, muß es sich dabei um eine kurzwellige Schwingung zwischen kleinen Teilkapazitäten oder um eine Wanderwelle kurzer Dauer handeln. Es findet sicher eine Induktionswirkung der verschiedenen Leitungen aufeinander statt und komplizierte Reflexionen von Sprungwellen bei der Zündung der einzelnen Schaltfunkenstrecken.

Erhöht man die Zeitkonstante des Kreises, der durch die Kapazität der Funkenstrecke zur Erde gebildet wird, in geeigneter Weise durch einen möglichst kapazitätsfreien Widerstand, so kann eine kurzzeitige Spannungsänderung nicht mehr an der Funkenstrecke zur Wirkung kommen. Wird der Widerstand zu groß, so wird allerdings auch die Nutzspannung nicht mehr die Funkenstreckenkapazität voll aufladen.

In Fig. 8 bedeutet C die Kapazität der Anlage, W Vorschaltwiderstand, C_1 die Kapazität der Funkenstrecke. Der Wert von W wurde von ca. 10 Ohm bis 10^7 Ohm verändert. An den Widerständen kommt dabei

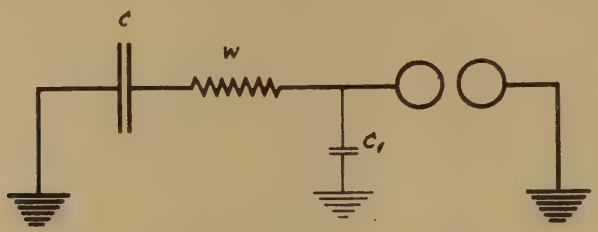

Fig. 8

Schaltung zur Auffindung der Ueberspannung. C = Stoßanlage, W = Vorschaltwiderstand, C_1 = Ersatzkapazität der Funkenstrecke.

die volle Stoßspannung kurz nach der Schaltung zur Wirkung. Es wurden größtenteils Wasserwiderstände bzw. Elektrolyt-Widerstände benutzt. Die niedrigen Werte waren Drahtwiderstände. Auch ein be-

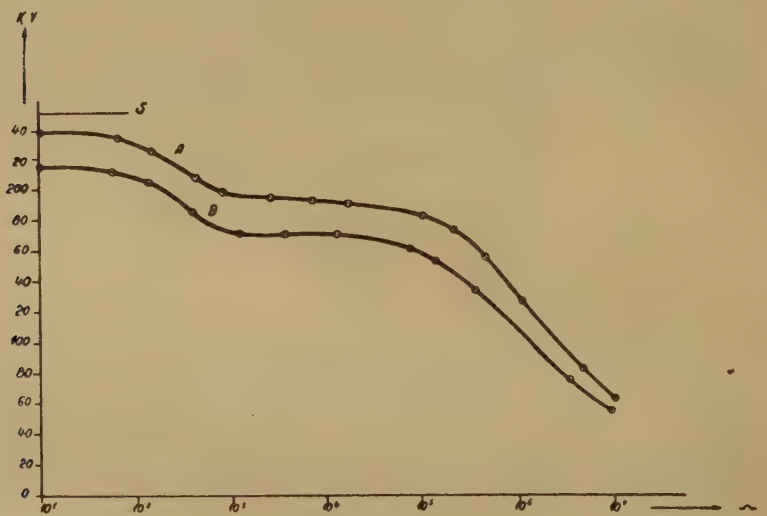

Fig. 9

Abhängigkeit der an der Funkenstrecke gemessenen Spannung vom Vorwiderstand. Beispiel A bei der großen Anlage mit 1500 cm Endkapazität, B bei 3000 cm. Die Summe aller Einzelspannungen S ist etwas größer als die höchste gemessene Spannung im Fall A.

sonders konstruierter Drahtwiderstand von $4 \cdot 10^6$ Ohm in Oel ergab einen Punkt, der gut in die Kurve Fig. 9 hineinfiel. Die Kurve wurde aufgenommen, indem die Stellung der Zündfunkenstrecke festgehalten

wurde, der Widerstand dann verändert und jedesmal mit der Kugelfunkenstrecke die Spannung gemessen wurde. Bei Widerstandswerten von ca. 10^3 Ohm bis 10^5 Ohm bleibt die gemessene Spannung konstant. Bei der kleinen Versuchsanlage zeigte ein ähnlicher Versuch die Uebereinstimmung der so gemessenen Spannung mit der errechneten. Es ist auf diese Weise möglich, die wahre Nutzspannung zu messen und zugleich die Ueberspannung von der Röhre fernzuhalten. Es muß natürlich ein eventuell auftretender Spannungsabfall berücksichtigt werden.

Die Auffindung und Messung der Ueberspannung, die mittels der Widerstände ohne Zuhilfenahme von Oszillographen möglich ist, gibt auch die Erklärung für einige Erscheinungen, die beim Arbeiten mit Stoßspannung vielfach, aber in unserem beschränkten Raum in besonders hohem Maße auftreten. Die Dimensionierung der Anlage erfolgte für 1,4 Millionen Volt Gesamtspannung, so konnte höchstens diese Spannung erzeugt und gemessen werden. Da aber die Ueberspannung schon früher Ueberschläge verursacht, so ist die erreichbare Nutzspannung viel kleiner, auch die Ladespannung darf nicht ganz 200 kV erreichen. Will man nun die Ueberspannung von der Röhre und Funkenstrecke durch einen Widerstand fernhalten, wozu Isolationslängen von über 3 m erforderlich sind, so trennt man gleichzeitig die Kapazität der Funkenstrecke von der Anlage ab. Die Fig. 10 zeigt schematisch die

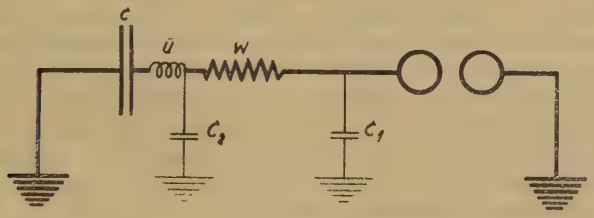

Fig. 10

Schematische Darstellung der Verhältnisse bei der Unterdrückung der Ueberspannung durch einen Widerstand. C = Ersatzkapazität der Stoßanlage, Ü = Leitungsteil, an dem die Ueberspannung entsteht, C_2 = Kapazität des Spannungspols, W = Vorwiderstand, C_1 = Kapazität der Funkenstrecke.

dabei vorliegenden Verhältnisse. C ist die Kapazität der Anlage, bei Ü sei die Entstehungsstelle der Ueberspannung, die die Teilkapazität C_2 um deren Betrag höher auflädt als die Gesamtkapazität. C_2 wird gebildet durch die Kapazität der Teile, die mit dem Spannungspol verbunden sind. W ist der Vorschaltwiderstand, C_1 die Kapazität der Funkenstrecke. Ist W überbrückt, so liegt C_1 zu C_2 parallel. Durch das Einfügen von W wird diese Verbindung getrennt und die Zeitkonstante des Kreises Erde—C—Ü—C_2—Erde wird verkleinert, die Spannung an C_2 schnellt in die Höhe, dasselbe tritt auch ein bei Abschaltung der Funkenstrecke. Im Kreis Erde—C—Ü—W—C_1—Erde dagegen wird durch

das Einfügen von W die Zeitkonstante vergrößert, wodurch die Ueberspannung an C_1 praktisch zu Null gemacht werden kann. Man erkennt, daß durch diese Maßnahme eine erhöhte Anforderung an die Isolation des Spannungspols der Anlage gestellt wird, da ja durch die Beseitigung der Ueberspannung an der Funkenstrecke und Röhre dort eine höhere, wenn auch kürzer dauernde Spannung entsteht. Man kann daher in einem Raum, wie er für diese Anlage zur Verfügung stand, wegen der für den Betrieb von Röhren notwendigen Einfügung des Widerstandes die Anlage nicht voll erregen. Schon bei einer Nutzspannung von etwa 700 000 Volt treten Ueberschläge bis 1,60 m vom Spannungspol der Anlage zu geerdeten Teilen auf. Bei negativer Polarität läßt sich etwas höhere Spannung erzielen, weil das Ueberschlagen der weiten Strecken dann etwas mehr verzögert einsetzt.[1])

Versuche mit Röntgenröhren an Stoßspannung.

Mit dieser Anlage wurden Versuche mit gewöhnlichen Glasröntgenröhren gemacht, zunächst, um zu prüfen, ob die kurze Belastungszeit eine wesentliche Spannungserhöhung zuläßt. Zu Anfang wurde, wie damals allgemein, angenommen, daß die Messung mit der Kugelfunkenstrecke die Spannung an der Röhre ungefähr richtig gibt. Dabei wurde der Anschein erweckt, als ob einzelne Röhren bedeutend höhere Stoßspannung vertragen als z. B. pulsierende Gleichspannung, andererseits zeigte sich, daß infolge der sehr großen Momentanleistung, die die Stoßanlage liefern kann, leicht heftige Entladungen einsetzen, die zu Durchschlägen mit starken Zerstörungen führen. Als dann die Untersuchung der Ueberspannung durchgeführt war, wurden stets Widerstände vor die Röhre geschaltet, die zugleich die Neigung zu zerstörenden Durchschlägen herabsetzten. Es wurde nun aber gefunden, daß viele Röhren lange nicht so hohe Stoßspannung aushielten wie kontinuierliche Spannung. Verschiedene Gründe können dafür in Betracht kommen. Alle untersuchten Röhren besaßen Kathoden, die nicht soviel Emission hergeben konnten, wie zu einer gleich starken Erhitzung der Antikathode benötigt würde, wie sie bei kontinuierlichem Betrieb auftritt; deshalb sind die Verhältnisse im Innern anders. Ferner konnte die Spannung nicht von kleinen Werten an ohne Unterbrechung gesteigert werden, und schließlich kann die bei plötzlichem Anlegen der Spannung sich einstellende kapazitive Verteilung zu einer anders gearteten Belastung führen.

[1]) Es ist mir inzwischen gelungen, eine überspannungsfreie Stoßanlage zu bauen.

Da auch die Vermutung bestand, daß kleinere Kapazitäten nicht so leicht zu einer Schädigung der Röhren führen würden, wurde eine zweite und später eine dritte Anlage für die Untersuchung von Röhren gebaut. Die zweite Anlage wurde schon vorher erwähnt, mit ihr wurden die ersten Messungen der Ueberspannung durchgeführt. Sie bestand aus 8 Stufen mit einer Endkapazität von 450 cm gegenüber 3000 der großen Anlage. Die Funkenstrecken wurden durch gekreuzte Zylinder gebildet. Der Abstand konnte bei allen gemeinsam reguliert werden. Zwischen die Zylinder wurde Preßluft geblasen, um eine schnelle Entionisation zu erreichen. Die Widerstände waren Wasserwiderstände. Die Zeitkonstante dieser Anlage war etwa dieselbe wie bei der großen, etwa $5 \cdot 10^{-4}$ sec. Es wurde eine Stoßgeschwindigkeit bis etwa 50/sec. erreicht, doch konnte das nur wenige Minuten durchgeführt werden, da das Wasser in den Widerständen zum Kochen kam. Die maximal erreichte Nutzspannung war etwa 370 kV, etwa 50% der Summationsspannung.

Die günstigen Erfahrungen, die hiermit an Röntgenröhren gemacht wurden, führten zum Bau der dritten Anlage, die speziell auf den Betrieb normaler Glasröntgenröhren zugeschnitten wurde. Es wurde die geänderte Schaltung Fig. 11 benutzt. Dadurch, daß die Widerstände

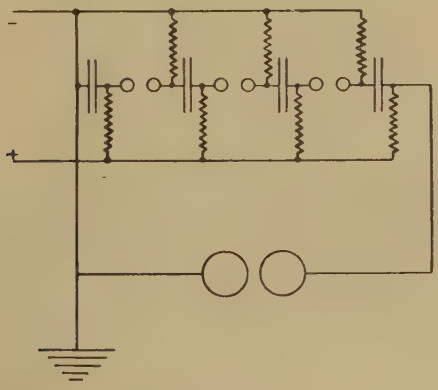

Fig. 11

Die abgeänderte Schaltung, die bei der kleinen Stoßanlage für sehr schnelle Stoßfolge angewandt wurde. Alle Kondensatoren werden gleich schnell aufgeladen.

über 10 Megohm groß gemacht werden konnten, wurde eine Zeitkonstante größer als 10^{-3} sec. erzielt. Um beliebig schnelle Stoßfolgen anwenden zu können, wurde Wasser durch die dünnen Widerstandskapillaren gepreßt. Die eine Sammelschiene war geerdet, hier wurde die Wasserleitung benutzt, die andere erhielt die Gleichspannung zur Ladung. Die Kühlung wurde hier durch eine besondere Pumpe mit Luftgebläse besorgt. Die mit Preßluft entionisierten Zylinderfunken-

strecken konnten ohne Unterbrechung des Betriebes gemeinsam reguliert und abgelesen werden, auch die vor der Röhre befindliche Vorschaltfunkenstrecke wurde dabei mitgeändert. Mit dieser Anlage wurden Stoßfolgen bis zu 400/sec. erreicht, bei voller Spannung (425 kV Nutzspannung) noch 20/sec. Bei Versuchen mit einer Spezialfunkenstrecke wurden sogar 700 Stöße/sec. erzielt. Begrenzt wurde die Geschwindigkeit der Aufladung durch die Leistungsfähigkeit des Primärtransfomators, der bis zu 200 Amp. belastet wurde. Obwohl bei kleinerer Spannung die Leistungsgrenze nicht erreicht wurde, durfte die Wicklung nicht mit größeren Strömen belastet werden. Die Stöße wurden gezählt, indem ein Papierband eine bekannte Zeit durch eine Funkenstrecke geführt wurde. Die Anzahl der Löcher dividiert durch die Zeit ergibt die Stoßgeschwindigkeit.

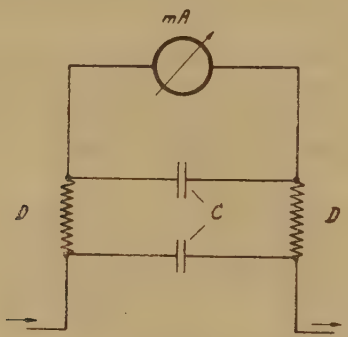

Fig. 12

Schutzschaltung des Milliampèremeters zur Strommessung bei Stoßbetrieb. Im Moment des Stoßes wird der untere Kondensator C aufgeladen, der sich langsam über die Drosseln D und das Milliampèremeter entlädt. Die Drosseln sind abgestuft, die kleine Stoßkomponente, die kapazitiv übertragen wird, wird durch die zweite Kapazität unschädlich gemacht.

Bei der großen Zeitkonstante konnte fast die gesamte Energie der Kondensatoren in Kathodenstrahlenergie umgewandelt werden. Zirka 75% der in ihnen aufgespeicherten Elektrizitätsmenge flossen durch die Röhre ab. Bei Spannungen über 100 kV wurde Weißglut der Wolframanoden erreicht, wie sie im gewöhnlichen kontinuierlichen Betrieb auftritt. Jede Röhre wurde anfangs bei niedriger Spannung eingeschaltet. Allmählich wurde die Zündfunkenstrecke vergrößert, damit also die Spannung langsam erhöht, wobei gewöhnlich die Primärstromstärke konstant gehalten wurde. Um den mittleren Strom auch bei dieser schwankenden Belastung messen zu können, wurde ein Milliamperemeter durch abgestufte Drosseln D gegen die Stöße geschützt gemäß Schema Fig. 12. Die Kondensatoren C haben 4 μF und halten allen

Stößen bei Spannungen bis 500 000 Volt stand. Am Instrument liest man den linearen Mittelwert der Stromstärke ab. Es wurden bis etwa 3 mAmp. erreicht bei Spannungen bis 425 000 Volt. Die Emission der Röhre konnte ohne Unterbrechung der Spannung geändert und so eine mittlere Stromstärke eingestellt und eingehalten werden. So wurde die Röhre in derselben Weise wie sonst an kontinuierlicher Spannung hochgetrieben. Es zeigte sich eindeutig, daß bei dieser Betriebsform und bei der kleinen Kapazität der Anlage erheblich höhere Spannungen angewendet werden können.

Es wurde eine große Anzahl vergleichender Versuche mit verschiedenen Röhren gemacht, bei denen der Einfluß der Elektrodenform, von Abstand und Vorbehandlung der Elektroden, Größe und Material des Kolbens usw. untersucht wurde in seiner Bedeutung für die Vorstellungen vom Entladungsmechanismus, die im zweiten Teil der Arbeit behandelt werden. Es wurden Spezialröhren gebaut mit Kathoden großer Emission, die auch bei der langsamen Stoßfolge der großen Anlage eine mäßige Belastung der Antikathode zuließen. Schließlich wurde die große Stoßanlage umgebaut, die Kapazität wurde durch Herausnehmen je eines Kondensators auf die Hälfte verkleinert, sie beträgt jetzt 1500 cm. Die Röhren wurden verglichen in ihrem Verhalten bei Stoßspannung schneller Folge bei kleiner Kapazität gegenüber der Spannung der großen Anlage, gegenüber kontinuierlicher und pulsierender Gleichspannung und z. T. gegenüber Wechselspannung von 50 Perioden, die bis 300 kV zur Verfügung stand. Bei Röntgenröhren wurden Versuche gemacht, die mittlere Härte der Strahlung bei verschiedenen Spannungsformen zu vergleichen; Filme wurden durch abgestufte Bleifilter belichtet. Die erhaltenen Schwärzungen wurden photometriert. Z. B. wurden an pulsierender Gleichspannung solange Aufnahmen mit veränderter Spannung gemacht, bis die Abstufung der Schwärzung der bei einer bestimmten Stoßspannung erhaltenen entsprach. Bei einer Vorfilterung von $^1/_2$ mm Blei erwies sich die von einer Röhre ausgehende Röntgenstrahlung etwa als gleich hart bei 230 kV pulsierender Gleichspannung bzw. 300 kV Stoßspannung und bei 300 kV pulsierender Gleichspannung bzw. 400 kV Stoßspannung. Diese Versuche hatten zunächst nur orientierenden Charakter und werden z. Zt. noch fortgesetzt.

Wesentlich für diese Arbeit waren die Beobachtungen von Röhren unter den verschiedensten Verhältnissen; sie wurden außer an Röntgenröhren der üblichen Art auch an Ventilen und an mancherlei Spezialröhren aus Porzellan und Glas angestellt. Es zeigte sich, daß für viele Zwecke der Glühelektronenstrom der Röntgenröhre ohne Bedeutung ist und die Beobachtung erschwert. Deshalb wurden Ventile benutzt, die in der Sperrichtung Spannungen neuerdings bis zu 430 000 Volt standzuhalten vermochten, ferner Röntgenröhren ohne Heizung des Glühfadens und Porzellanröhren, die überhaupt keine Glühkathode besaßen. Bei der Sichtung des umfangreichen Beobachtungsmaterials erschien es mir vorteilhaft, die Einteilung der Erscheinungen beim Anlegen hoher

Spannung unter 2 Gesichtspunkten vorzunehmen. Es findet eine Begrenzung der Spannungssteigerung statt

1. durch Entladungen, die sich im freien Raum zwischen den Elektroden ausbilden,
2. durch Entladungen, die an den Wänden des Entladungsgefäßes hervorgerufen werden.

Für diese beiden Hauptarten der Spannung begrenzenden Entladung werde ich im folgenden versuchen, Erklärungen zu geben, die durch die hier angestellten Beobachtungen und durch einzelne Arbeiten anderer, die sich mit derselben Frage beschäftigten, gestützt werden.

Untersuchung der Elektrodeneffekte.

Wenn in einem Gasraum bei einer bestimmten Spannung eine selbständige Entladung brennt, so muß die Anzahl der Elektronen (nur solche kommen als negative Teilchenen bei höherer Spannung in Frage), die an der Stromleitung beteiligt sind, durch die Wirkung der positiven Ionen genau aufrecht erhalten werden. Der Vorgang ist derart, daß die Elektronen bei ihrem Flug zur Anode eine bestimmte Zahl positiver Ionen durch Stoßionisation der Gasmoleküle freimachen. Diese fliegen zur Kathode und erzeugen bei ihrem Aufprall auf das Metall wieder die gleiche Anzahl Elektronen, wie zu ihrer eigenen Entstehung nötig waren. Es herrscht ein Gleichgewichtszustand, und der Strom bleibt konstant. Betrachtet man den Vorgang bei Drucken, die kleiner sind als bei der Minimumspannung der betreffenden Anordnung, so sinkt bei einer Druckverminderung die Ionisierungswahrscheinlichkeit der Elektronen, dann muß die Spannung ansteigen. Es stellt sich ein neuer Gleichgewichtszustand ein, bei dem die geringere Ausbeute an positiven Ionen durch die größere Anzahl Elektronen, die bei dem Aufprall jedes Ions entsteht, ausgeglichen wird. Wie weit das bei immer kleineren Drucken und höheren Spannungen möglich ist, muß aus dem Gange der Trägerbildung beiderlei Vorzeichens mit der Spannung hervorgehen.

Daß der Wirkungsgrad der Erzeugung positiver Ionen durch Stoß von Elektronen im Gasraum mit höherer Spannung nicht ansteigt, wurde schon früh gefunden. Zwar findet ein anfänglicher Anstieg statt, aber nach einem Maximum in der Gegend von 300 Volt folgt ein dauernder Abfall. Die gesamte Ausbeute an Sekundärelektronen und damit auch an positiven Ionen pro cm Weg strebt bei hohen Elektronengeschwindigkeiten einem konstanten Wert von etwa 30—40 bei Atmosphärendruck zu. Der bei sehr hoher kinetischer Energie auftretende Wieder-

anstieg ist in diesem Zusammenhang ohne Interesse. Die Fig. 13 zeigt den Verlauf, wie er sich aus einer Tabelle ergibt, aus Geiger und Scheel, Handbuch der Physik, 1932, Bd. 22 II, S. 56. Bei höherem Druck wäre zu berücksichtigen, daß die Sekundärelektronen beschleunigt werden und ihrerseits ionisieren, wodurch die Teilchenzahl lawinenartig wächst.

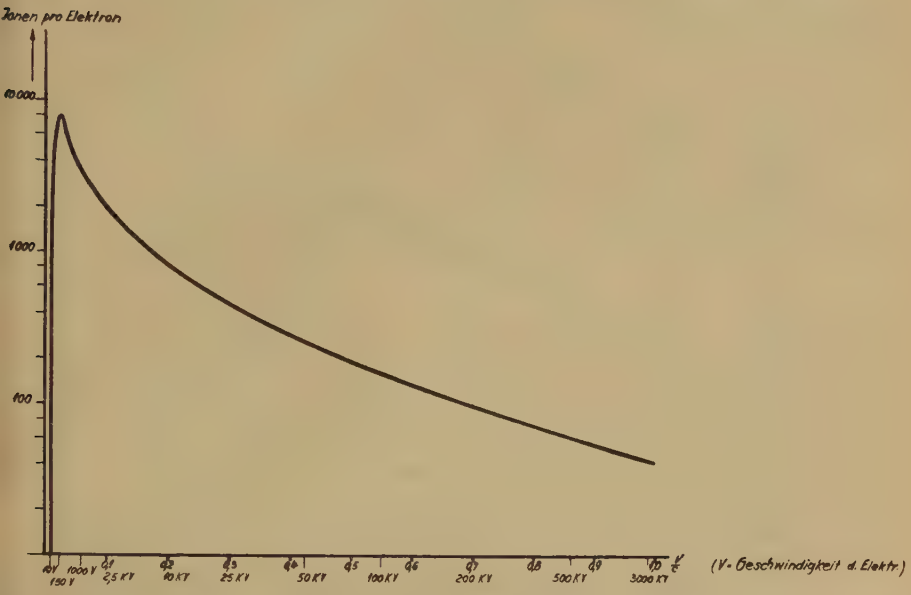

Fig. 13
Abhängigkeit der spez. Ionisation der Elektronen von der Geschwindigkeit.

Ist aber der Druck so klein, wie tatsächlich an gut entgasten Röntgenröhren vorausgesetzt werden kann, daß nur selten von einem Elektron ein Ionenpaar erzeugt wird, so wird die Wahrscheinlichkeit für die Bildung von Tertiärelktronen natürlich zu vernachlässigen sein. Ebenso kann die Stoßionisation durch die wenigen positiven Ionen bei ihrer Beschleunigung im Feld die Gesamtträgerzahl nicht wesentlich vergrößern Der letzte Vorgang, der eine Vergrößerung der Trägerzahl bei Erhöhung der Spannung bringen könnte, ist die Auslösung von Elektronen durch den Aufprall der positiven Ionen auf die Kathodenoberfläche. Hier zeigt sich tatsächlich eine Zunahme bis zu etwas höheren Spannungen, jedoch nimmt die Zahl bei Ionenergien über 50 000 Volt wieder ab, da die Ionen immer tiefer eindringen, während die Sekundärelektronen aus größerer Tiefe nicht mehr austreten können (Fig. 14).[2]) Man sieht also, daß oberhalb 50 kV eine weitere Erhöhung der Span-

[2]) Geiger und Scheel, 1927, Bd. 24, S. 110.

nung auf keine Weise mehr die Abnahme der Stoßionisation durch Elektronen, die bei Erniedrigung des Druckes eintritt, ausgleichen kann, wenn man die alte Erklärung der Vorgänge benutzt. Es müßte der Strom abnehmen bis auf den durch Spontanionisierung ermöglichten Wert (durch Ultrastrahlen, Radioaktivität usw.). Keine noch so hohe

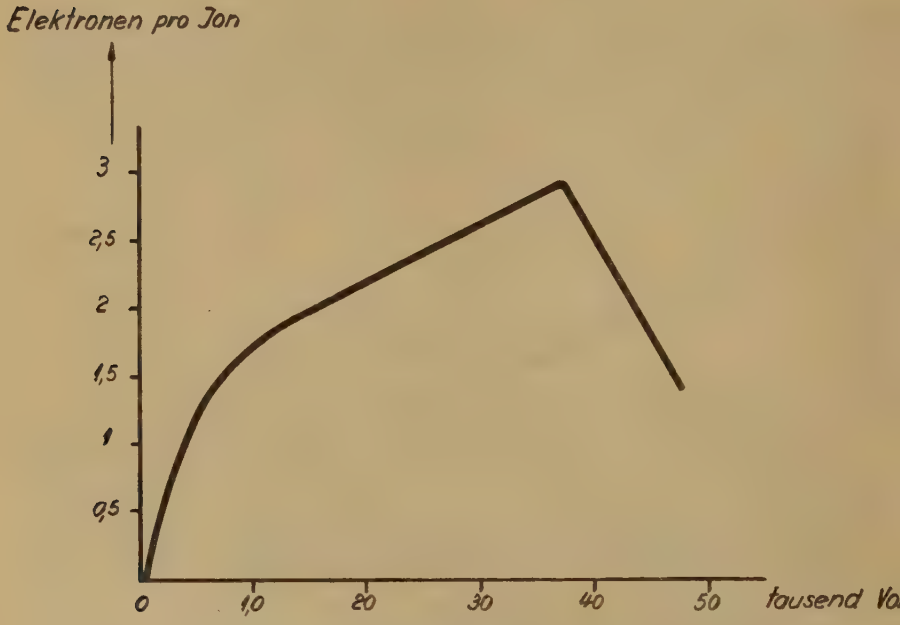

Fig. 14
Abhängigkeit der an Metallflächen ausgelösten Elektronenzahl von der Beschleunigungsspannung der auftreffenden Ionen.

Potentialdifferenz dürfte mehr ein Anwachsen des Stromes hervorrufen. Demnach ist auch die Arbeitsweise einer Ionenröhre bei Spannungen über 50 kV nicht mehr auf die gewohnte Weise zu erklären. Man nahm dennoch allgemein an, daß die Entladungen auch bei Hochspannungsröhren Gasentladungen seien. Man glaubte, daß sich vielleicht im Betrieb das Vakuum so verschlechtern könne, daß der Druck zur Stoßionisation ausreichen könnte. Messungen mittels Ionisationsmanometer bei angelegter Hochspannung zeigten aber bei uns bei solchen Röhren, die Entladungen gaben, einen Druck von 10^{-4} mm Hg und weniger.

Um einen Anhalt dafür zu finden, bei welchem Druck der Strom verschwinden müßte, sollen folgende überschlagsmäßige Betrachtungen über die Verhältnisse in einer Röhre angestellt werden, bei der der Abstand der Elektroden 30 cm, der Druck 10^{-3} mm Hg sei. Die Wand soll

so entfernt sein, daß durch ihre Mitwirkung keine Störungen auftreten. An der Röhre mögen 100 kV liegen. Da die freie Weglänge für Elektronen bei 10^{-3} mm Hg 25—28 cm (gaskinetisch) ist, erleidet jedes Elektron ca. 1 Durchgang durch 1 Atom. Da die Geschwindigkeit nicht konstant ist, muß man eine mittlere Geschwindigkeit etwa 30 kV entsprechend annehmen. Elektronen dieser Energie machen pro 30 cm Weg bei 10^{-3} mm Hg $1{,}2 \cdot 10^{-2}$ positive Ionen frei. Für die pro positives Ion an der Kathode ausgelöste Elektronenzahl werden in verschiedenen Arbeiten Werte von ca. 3—6 bei 30 kV angegeben;[3]) $1{,}2 \cdot 10^{-2}$ positive Ionen erzeugen also beim Aufprall nur $4—7 \cdot 10^{-2}$ Elektronen. Als Ersatz für 1 Elektron steht also nach einmaligem Durchlaufen der Wegstrecke nur weniger als der zehnte Teil an neu gebildeten zur Verfügung. Es müßte demnach selbst unter diesen sehr ungünstigen Verhältnissen unmöglich sein, einen Strom durch die Röhre zu schicken. Bei weiterer Druckerniedrigung wie auch bei Steigerung der Spannung wären die Bedingungen für ein völliges Sperren der Röhre nur noch günstiger.

In Wirklichkeit liegen die Verhältnisse ganz anders. Pumpt man eine Röhre gut aus, so erlischt schließlich der Strom und bleibt auch anfänglich Null bei Steigerung der Spannung. Bei weiterer Spannungserhöhung setzt aber wieder ein Strom ein, vielfach diskontinuierlich. Ein weiteres Auspumpen bringt diesen Strom nicht zum Verschwinden, wohl aber erlischt er nach Verlauf einiger Zeit von selbst ohne Aenderung des Gasdruckes. Es besteht keine zeitliche Konstanz. Man kann ein und dasselbe Rohr bei stets demselben Gasdruck in einem Zustand erhalten, in dem kein Stromdurchgang stattfindet oder in einem solchen, daß bei derselben Spannung erhebliche Ströme hindurchgehen. Diese Beobachtung wurde angestellt von Janitzki, der eine Reihe von Versuchen zur Klärung dieser Erscheinung anstellte.[4]) Er beobachtete, daß eine Elektrode durch die Entladung allmählich ihre Fähigkeit verliert, als Anode in einer Ionenröhre zu dienen, später auch als Kathode. D. h., wurde die betreffende Elektrode als Anode benutzt, so ließ sich kein Strom durch die Röhre erhalten, während bei Umpolung noch Durchgang stattfand. Auch dieser Strom wurde nach und nach schwächer, ohne daß während der ganzen Zeit der Gasdruck geändert wurde. Kontrollelektroden, die in demselben Vakuumraum eingeschmolzen, aber vorher nicht an der Entladung beteiligt waren, ließen schon bei weit niedrigerer Spannung einen kräftigen Strom hindurch. Bei der Kathode ist diese Einwirkung der Entladung verständlich, denn durch das Bombardement mit positiven Ionen wird die Gasbeladung der Oberfläche entfernt, wodurch die Ausbeute an Elektronen bei Ionenaufprall kleiner wird.[5]) Die Anode jedoch dient bei der üblichen Vorstellung

[3]) Baerwald, Annal. d. Phys., Bd. 60, 1919, S. 1 und Campbell, Phil. Mag. 29, S. 783, 1915.

[4]) Janitzki, Zs. f. Phys., 11, 1922, S. 22/30 und Janitzki, Journal de Physik et de Radio, 1, 1930, S. 158.

[5]) Geiger und Scheel, Bd. 24, S. 111 und Cheney, Phys. Rev. X, 334, 1917.

von der Gasentladung lediglich als Auffänger für die Elektronen, und ihre Beschaffenheit ist für die Stromstärke belanglos. Janitzki nahm an, daß durch das Feld positive Ionen aus der Anode gezogen werden. Diese Ionen sollen dadurch entstehen, daß die im Metall gelösten Gasatome durch die Feldkräfte der Metallatome ionisiert werden. Diese Ansicht scheint durch spätere Versuche widerlegt zu sein.

Wo aber kommen die Elektrizitätsträger her, die den Strom aufrecht erhalten? Die meist verbreitete Ansicht war bisher die, daß durch die hohe Feldstärke Elektronen aus der Kathode gezogen werden, wie das von Lilienfeld zuerst festgestellt wurde. Wenn diese Ansicht auch in besonderen Fällen ohne Zweifel eine Erklärung ermöglicht, so stellen sich ihrer allgemeinen Anwendung folgende Tatsachen entgegen:

1. Der Stromanstieg erfolgt bereits bei Feldstärken, bei denen nach anderen Versuchen unter keinen Umständen kalte Elektronenemission beobachtet wurde, auch dann nicht, wenn man den Einfluß der Gasbeladung auf der Kathode berücksichtigt.
2. Der kalte Elektronenstrom steigt mit wachsender Feldstärke außerordentlich plötzlich an, die absolute Höhe der Spannung ist dabei ohne Einfluß. Es müßte also bei richtig geformten Elektroden die Verdopplung des Abstandes eine Verdoppung der Spannung zulassen. Das bestätigt die Erfahrung nicht. So tritt z. B. beim Betreiben einer Röntgenröhre keine Aenderung der geometrischen Bedingungen ein. Die anfangs kritische Feldstärke wird nicht herabgesetzt. Dennoch verträgt die Röhre nach der Behandlung, die eine Veränderung der Anode bewirkt, eine viel höhere Spannung.
3. Die Versuche von Janitzki, die auch durch unsere Erfahrungen ergänzt werden, können nicht erklärt werden. Ein Einfluß der Beschaffenheit der Anode, der hierbei sicher nachgewiesen wird, schließt die Anwendung des Lilienfeld-Effektes als Erklärung aus.

Es bleibt demnach nur die Möglichkeit, eine Auslösung positiver Ionen an der Anode anzunehmen und die Versuche anders zu erklären, die zu zeigen schienen, daß sich auch bei hohen Feldern keine positiven Ionen an der Entladung beteiligen. Ein Umstand, der bei genauer Betrachtung die Beteiligung von positiven Ionen an der Entladung wahrscheinlich macht, ist das Auftreten der grünen Punkte und Flecke an der Glaswand. Diese Fluoreszenz wird erzeugt durch den lokal begrenzten Aufprall von Elektronen auf die Wand. Nimmt man an, daß diese Elektronen durch hohe Feldstärke an Kathodenteilen entstehen, so müßten sie von Stellen ausgehen, an denen die Feldstärke ihren größten Wert hat. Diese Stellen liegen aber unter der Voraussetzung einer gleichmäßigen Oberflächenstruktur stets so, daß die von dort ausgehenden Elektronen auf kurzen Wegen die Anode treffen müssen. Da Fluoreszenspunkte an weit in den Hälsen zurückliegenden Stellen beobachtet werden, wohin niemals Autoelektronen gelangen können, so muß ihre Entstehung andere Ursachen haben. Man muß ein allgemeines

Bombardement der Kathodenteile mit positiven Ionen annehmen, durch das Elektronen ausgelöst werden. Werden dabei bestimmte Stellen getroffen mit kleinerer Austrittsarbeit, so treten von ihnen begrenzte Bündel von Elektronenstrahlen aus, die durch den Feldverlauf irgendwo auf die Glaswand geworfen werden können. Dort entstehen die beobachteten Fluoreszenzpunkte. Für die Erklärung des Vorganges sind also positive Ionen erforderlich. Sie könnten prinzipiell auch aus dem Gasraum stammen, doch schlossen ja die vorher gemachten Ueberlegungen eine Ionisation im Gasraum aus.

Es ist zu berücksichtigen, daß gegenüber der Ablösung von Elektronen durch hohe Felder bei der Ionenerzeugung der prinzipielle Unterschied besteht, daß es sich in einem Falle um nur eine einzige Art von Partikeln handelt, die zudem in jedem Atom in der Ueberzahl vorhanden sind, im anderen Falle um eine große Verschiedenheit möglicher Korpuskeln in begrenzter Menge. Denn, da es nicht denkbar erscheint, daß die Atome des Kristallgitters, aus dem die Anode besteht, herausgerissen werden könnten, müssen andere Atome, die nur als Verunreinigung in geringerer Anzahl und schwächerer Bindung vorhanden sind, dabei beteiligt sein. Die meisten früheren Arbeiten behandelten nur die Frage, ob solche Fremdatome durch die Wirkung der hohen Feldstärke aus dem Gitter herausgezogen werden können. Es soll hier eine andere Art der Ionenentstehung erörtert werden, die eine gute Erklärung der Vorgänge ermöglicht, wenn auch das physikalische Geschehen im Metall der Anode noch nicht geklärt erscheint. Die Elektronen, die anfangs in geringer Zahl z. B. durch Radioaktivität oder Photoeffekt vorhanden sind, prallen mit um so größerer kinetischer Energie auf die Anode, je höhere Spannung an der Röhre liegt. Sie dringen dabei immer tiefer in das Metall ein, um bei hoher Potentialdifferenz viele Tausend Atome zu durchdringen. Sie werden dabei auch Fremdatome treffen und ionisieren, ihnen vielleicht auch eine gwisse kinetische Energie erteilen. Auf diese Weise können die von Janitzki angenommenen Ionen entstehen. Es ist auch denkbar, daß eingeschlossene oder adsorbierte Beimengungen von Oxyden, Karbiden oder ähnlichen Verbindungen zertrümmert und ionisiert werden. Wenn dabei Ionen großer Elektronenaffinität wie z. B. Sauerstoff oder Halogene entstehen, so werden sie sofort wieder Elektronen einfangen, dagegen werden Wasserstoffionen oder Na-, K-, Ca-Ionen, soweit sie sich an der Oberfläche befinden, durch das Feld herausgezogen werden. Wie der Transport aus der Tiefe im Einzelnen vor sich geht, dafür läßt sich noch keine begründete Erklärung geben. Daß Ionen als solche im Metall diffundieren, ist in einzelnen Sonderfällen bekannt, z. B. Protonen in Palladium, Thorium in Wolfram oder Molybdän usw. Im allgemeinen stehen einer solchen Annahme Schwierigkeiten entgegen. Man könnte vielleicht daran denken, daß die Wirkung der Elektronen in der Tiefe nur in der Zertrümmerung von Verbindungen besteht und daß ein dabei entstehender lokaler Ueberdruck die Fremdatome durch feine Poren oder Risse nach außen treibt.

Mit der hier dargelegten Hypothese lassen sich alle früheren Arbeiten, soweit die Bedingungen exakt genug angegeben sind, und unsere eigenen Beobachtungen erklären. Folgende Punkte sind dabei zu fordern und zeigen den Unterschied des hier betrachteten Vorganges von dem der Autoelektronenerzeugung.

1. Der Ionenstrom wird nicht durch das Feld an sich erzeugt, sondern wird erst ermöglicht durch den Aufprall von Elektronen. Er ist proportional dem Elektronenstrom und erlischt, wenn man verhindert, daß Elektronen auf die Anode fallen können.
2. Die Stromausbeute hängt nicht nur von der Feldstärke ab, sondern wesentlich von der Höhe der Potentialdifferenz der beiden Elektroden.
3. Der Strom bleibt niemals konstant, sondern nimmt stets mit der Zeit ab, da die notwendigen Fremdatome durch ihn beseitigt werden.

Eine wesentliche Stütze für die Ansicht, daß ein Ionenstrom durch den Aufprall von Elektronen entsteht, findet man in einer Arbeit von Bennett.[6]) Man kann bei seinen Versuchen deutlich erkennen, wie der Strom bei einer bestimmten Spannung durch Emission von Elektronen einsetzt, rasch ansteigt durch die Mitwirkung von positiven Ionen, die an der Anode oder, wie Bennett glaubt, dicht davor ausgelöst werden, um dann allmählich wieder abzunehmen. Bennett stellt sich vor, daß durch den Aufprall der Ionen ein Krater entsteht, wodurch die Elektronenemission steigt. Er berücksichtigt nicht, daß allein durch Ionen Elektronen erzeugt werden. Er nimmt ferner an, daß das Erlöschen des Stromes auf eine Zerstörung der emittierenden Teile zurückzuführen sei. Es wäre einfacher, hier an die Verarmung an ionisierbaren Atomen gemäß Punkt 3 zu denken, wodurch eine einfachere Erklärung hierfür gegeben wird.

Daß der Strom von der Röhrenspannung abhängt, beruht darauf, daß die Energie der Elektronen ansteigt. Bei höheren Spannungen dringen die Elektronen immer tiefer ein und durchsetzen immer mehr Moleküle. Wenn bei einer bestimmten Spannung der Ionenstrom im Laufe einiger Zeit verschwunden ist, so erhält man sofort einen erneuten Anstieg bei Erhöhung der Spannung, weil die Elektronen, die bisher nur eine bereits verarmte Schicht durchsetzt haben, nun bei ihrem tieferen Eindringen wieder auf neue Atome stoßen. Außerdem dringt das Feld tiefer in die Poren und Oberflächenrisse ein und erreicht Ionen, die vorher noch festgehalten wurden.

Von besonderer Bedeutung ist Punkt 3, der die Verarmung der Anode an Atomen betrifft, die Ionen liefern können. Es wurde bereits gesagt, daß diese Atome Verunreinigungen durch leicht ionisierbare Metalle oder Wasserstoff sein müssen. Eigene Versuche zeigten das starke Herabdrücken der Spannungsgrenze durch Einführung z. B. von Ba-

[6]) Phys. Rev. 1932, 40, S. 416/424: Effect of the target on breakdown in cold emission.

Metall sowie die Verschlechterung einer Röhre durch Verwendung autogen geschweißter Metallteile, bei denen Wasserstoff eingeschlossen wird. Ein Hinweis auf die Beteilung solcher Stoffe findet sich schon in der oben erwähnten Arbeit von Bennett (S. 424). Auf die Wirkung von Wasserstoff, Caesium und Thorium weist auch Beams hin.[7]) Der Gedanke, daß diese Atome, die ja als Ionen die Anode verlassen, allmählich verschwinden, ist schon in aller Klarheit in den Arbeiten von Janitzki ausgesprochen worden, ebenfalls die Folgerung, daß in dieser Tatsache die Erklärung dafür liegt, daß eine Anode in einer Ionenröntgenröhre ihre Fähigkeit verliert, als solche zu dienen. Falsch war wohl die Annahme, daß allein durch seine überdies recht schwachen Felder dauernd Ionen aus der Anode gezogen werden können. Dies tritt eben erst ein durch das Bombardement mit Elektronen.

Von diesem Gesichtspunkt ist auch die Behandlung richtig zu verstehen, die man in der Technik das „Betreiben" der Röntgenröhre nennt. Zuerst werden durch die Erhitzung die adsorbierten Gase von der Oberfläche entfernt, auch alle leicht verdampfenden Verunreinigungen der Oberfläche beseitigt. Diese Wirkung allein könnte man auch rein thermisch ohne Beteiligung von Elektronen erzielen. Es genügt dafür, die Oberfläche eine genügend lange Zeit auf hoher Temperatur zu halten. Weiterhin werden aber dann in längeren Zeiten durch die Elektronen auch an den Stellen der Anode, die nicht so stark erhitzt werden können, alle adsorbierten Gase beseitigt und vor allem alle chemischen Verbindungen, die die Oberfläche bedecken, zerstört. Jetzt kann die Röhre von der Pumpe getrennt werden, da keine nennenswerten Gasmengen im weiteren Betrieb mehr frei werden. Sie verträgt jetzt aber nur die Spannung, die bis dahin angewendet wurde. Würde man plötzlich eine viel höhere Spannung anlegen, so würden die Elektronen in Gebiete eindringen, die vorher noch nicht getroffen wurden und noch viele gefährliche Fremdatome enthalten. Dadurch, daß das Feld tiefer eingreift, würde sofort ein hoher Ionen- und damit auch Elektronenstrom zur Zerstörung der Röhre führen. Erst indem man ganz allmählich die Spannung erhöht, werden schrittweise die tieferen Schichten der Anode „entgast", wie man bisher sagte, d. h. also, befreit von allen den Stoffen, die als positive Ionen zur Kathode gezogen werden können. Man kann dann späterhin sofort eine solche Spannung an die Röhre legen, wie man sie vorher längere Zeit „gehalten" hatte, wobei eben bis zu einer bestimmten Eindringtiefe der Elektronen die Säuberung vorgeschritten ist. Es ist denkbar, daß in langen Zeiten durch ein Diffundieren von Stoffen aus der Tiefe wieder eine Verschlechterung des Zustandes der Anode eintreten kann. Man müßte die Röhre vielleicht nach langem Lagern erneut „betreiben". Eine gewisse Bestätigung dafür liefert die Erfahrung mit älteren Röntgenröhren. Ebenso macht sich ein zu hoher Gasdruck daran bemerkbar, daß die Metalloberfläche irgend welche Gase bindet, die als Ionen der Röhre

[7]) Phys. Rev. 41, 1932, S. 687 und Phys. Rev. 43, 1933, S. 382.

gefährlich werden können. So muß in einer Ionenröntgenröhre ein ständiger Rückstrom von wirksamen Stoffen aus dem Gasinhalt auf die Anodenfläche vorhanden sein, wenn die Röhre durch Einlassen von Gas regeneriert wird. Daß manche Stoffe unwirksam sind, zeigen die in neuer Zeit konstruierten Röhren mit verhältnismäßig hohem Edelgasdruck.

Diese Hypothese erlaubt auch eine Erklärung eines in der Röntgentechnik viel benutzten und bisher recht rätselhaften Vorganges, des „Phosphorierens". Hierbei wird in die Röhre, die nach dem Abschmelzen von der Pumpe und meist nach längerer hoher Belastung starke Ionenströme zeigt (grüne Punkte, Zucken der Röhre), ein wenig Phosphor hineindestilliert, dann wird Spannung angelegt und nach kurzem unregelmäßigem Aufleuchten arbeitet die Röhre wieder zufriedenstellend. Die Erklärung ist folgende. Durch das lange und heftige Elektronenbombardement sind aus der Tiefe der Anode Verunreinigungen an die Oberfläche zum Teil in den Raum gebracht worden. Sie geben Anlaß zu den beobachteten Ionenströmen. Die Beseitigung gelingt nicht mehr, da sich allmählich ein Gleichgewichtszustand mit dem Gasgehalt ausbildet, da ja nicht mehr gepumpt werden kann. Es steigt dabei nicht der Gasdruck, sondern nur der Anteil an gefährlichen Stoffen Na, H_2 uns. (diese Stoffe wirken zugleich auf der Kathode strombegünstigend!). Wird jetzt in Anwesenheit des Phosphors, der sich auf allen Wänden und Metallteilen niederschlägt, Spannung an die Röhre gelegt, so werden die sich bildenden Ionen durch P chemisch gebunden. Phosphor selbst beteiligt sich nicht an der Ionenbildung, da er eine große Elektronenaffinität hat, er bindet gerade die Stoffe, die sehr leicht Elektronen abgeben. Die sich auf den Metallteilen niederschlagenden Produkte werden dort bald wieder zerstört und schließlich finden sich alle Phosphorverbindungen und der Rest des freien Phosphors auf der Glaswand. Die Entladung erlischt, die Röhre ist besser, ohne daß das Vakuum sich irgendwie geändert hätte, wie bei uns durch Versuche erwiesen wurde, bei denen ein Ionisationsmanometer während des Betreibens den Gasdruck registrierte.

Es ist bisher nicht gelungen, die Unmöglichkeit des Austritts positiver Ionen aus Metallen zu beweisen. Alle Versuche befaßten sich mit speziellen Anordnungen, in denen an einem räumlich sehr wenig ausgedehnten Stück der Anode eine hohe Feldstärke erzeugt wurde. Dadurch wird nicht einmal der Gegenbeweis gegen die Hypothese der reinen Feldionen mit Sicherheit erbracht, denn es könnte ein anfänglicher Ionenstrom infolge der Kleinheit der betreffenden Stelle nach sehr kurzer Zeit wegen Verarmung zum Erlöschen kommen und der Beobachtung entgehen. Meist wurden die hier gezeigten Vorbedingungen zur Entstehung eines Ionenstromes absichtlich ausgeschaltet, indem die untersuchte Stelle sehr sorgfältig gereinigt, erhitzt und mit Elektronen bombardiert wurde. Es sind dann natürlich keine Ionen mehr zu erwarten. Die Bedingung, daß zur Bildung von Ionenströmen nicht nur hohe Feldstärken, sondern absolut hohe Spannung nötig sind, war

nicht bekannt. Es wurde daher vielfach mit räumlich sehr kleinen Anordnungen bei ganz niedrigen Potentialdifferenzen gearbeitet. Schließlich wurde absichtlich jedes Auftreten von Elektronenströmen verhindert, da sonst die Erkennung der Ionenströme nicht möglich gewesen wäre. Man hatte aber so jede Möglichkeit zu ihrer Ausbildung genommen. Bei der Kleinheit der untersuchten Anodenfläche fiel der Strom der Spontanelektronen zu allermeist auf andere Stellen vielfach geringerr Feldstärke.[8]) Wirklich entscheidende Versuche, die direkt den Ionenstrom zu messen gestatten, sind also bisher nicht gemacht worden. Der Grund dafür liegt in der Schwierigkeit der Trennung der Elektronen und Ionen, die nun auch noch in ihrer Bildung gekoppelt erscheinen. Man mußte sich daher auf die mehr indirekten Methoden der Beobachtung des Verhaltens von Entladungsröhren beschränken. Wenn auch die hier gegebenen Vorstellungen wegen der theoretischen Einwände und des Mangels entscheidender Versuche nur als eine vorläufige Hypothese aufgefaßt werden dürfen, so erscheint mir diese doch als Erklärung der Vorgänge unentbehrlich, vor allem deshalb, weil keine andere Annahme die Abhängigkeit der Spannungsgrenze von der Potentialdifferenz und ihre wahrscheinlich unbegrenzte Verschiebbarkeit durch „Betreiben" erklären kann. Es sollen aber weitere Untersuchungen angestellt werden, von denen ein experimenteller Nachweis der Ionen und ihrer Herkunft erwartet wird. Sollte die hier vorgeschlagene Anschauung in einzelnen Punkten versagen, so muß doch darauf hingewiesen werden, daß jedenfalls die alten Erklärungsversuche den Tatsachen nicht gerecht werden und daher ein neuer noch unbekannter Effekt eine Rolle spielen muß.

Untersuchung des Wandeffektes.

Die Entladungen durch Lilienfeld-Elektronen und durch den eben geschilderten Mechanismus der Bildung positiver Ionen an der Anode, also allgemein die Entladungen durch Vorgänge an den Elektroden, sind nun nicht die einzige Begrenzung für eine weitere Spannungssteigerung. Vielmehr zeigten bereits Brasch und Lange, daß die Spannungsfestigkeit weitgehend beeinflußt wird durch Vorgänge, die sich an der Wand abspielen. Diese sogen. Wandgleitung wurde von ihnen durch mancherlei Versuche sichergestellt und dafür eine Erklärung gegeben, die schließlich durch den Bau und die Erfolge des Lamellenrohres ihre beste Bestätigung erfuhr. Inzwischen konnte durch meine Tätigkeit am Orte der Herstellung und Prüfung technischer Röhren eine große Menge weiteres Beobachtungsmaterial gesammelt werden. Dadurch und durch

[8]) Eyring, Mackeown, Millikan, Phys. Rev. 31, 1928, S. 900/909.

eine ganze Anzahl von besonderen Versuchen kann jetzt die Erklärung der Vorgänge mit größerer Sicherheit und mehr Angaben von Einzelheiten gegeben werden. Vor allem bestand die Möglichkeit, bis zu extrem entgasten Röhren den Einfluß der Wandbeschaffenheit zu verfolgen. Die Spannungsgrenze selbst wurde genauer festgelegt und von Zufälligkeiten unabhängig gemacht durch die Art des Betreibens der Röhren, wie später beschrieben wird, und dadurch, daß die Entladungsgefäße Beobachtungsfenster aus Glas erhielten, um jede Entladung sofort an ihren Leuchterscheinungen zu erkennen. Bei Brasch und Lange wurde als Anzeichen einer Spannungsbegrenzung lediglich das Nichtansprechen einer Parallelfunkenstrecke benutzt. Jetzt konnten schon die ersten Entladungen erkannt werden, die noch nicht zum völligen Spannungszusammenbruch führten. Durch die Beobachtung von ganz aus Glas gebauten Röhren mit Ringen wurde anschaulich deren Wirkungsweise als übereinstimmend mit den entwickelten Vorstellungen gefunden. Als besonders gute Stütze für die Theorie muß ferner das erstmalig genauer studierte Verhalten der Gleitfunken gewertet werden.

Es soll hier die von Brasch und Lange gegebene Erklärung noch einmal dargelegt werden und die Vorgänge im Einzelnen etwas ausführlicher betrachtet werden. An einem Teil der Wand herrscht eine hohe tangentiale Feldstärke. Diese kann lokal noch vergrößert werden dadurch, daß Elektronen oder Ionen, die an den Elektroden entstanden sind, auf begrenzte Gebiete auffallen und dort Ladungen erzeugen. Wenn die Feldstärke an irgend einer Stelle einen gewissen kritischen Wert überschreitet, tritt eine Elektronenverschiebung längs der Wand in der Oberflächenschicht ein. Einzelne Elektronen setzen sich nach der positiven Seite hin in Bewegung; sie ionisieren die durchlaufenen Atome der Wand oder deren Gashaut und hinterlassen Fäden positiver Raumladung, da die positiven Ionen in der kurzen Zeit praktisch ihren Platz nicht verlassen. Eine Elektronenlawine wandert anodenwärts, während sich auf der der Kathode zugewandten Seite an der Spitze der Raumladungsfäden die Feldstärke sehr stark vergrößert. Dadurch kommen neue Elektronen in Bewegung. Es spielt sich derselbe Vorgang ab, wie beim Durchbruch einer Gasfunkenstrecke, hier allerdings in dem an der Oberfläche adsorbierten und kondensierten Gas, bei sehr gut gereinigten Wänden aber in der Oberflächenschicht des Isolators selbst. Sobald die Elektronen eine gewisse Geschwindigkeit erreichen, werden sie in den freien Raum gestreut und fliegen zur Anode. Die positive Wandladung, die durch das Abwandern der Elektronen entsteht, schiebt sich immer mehr zur Kathode vor, bis die Feldstärke zur Auslösung von Elektronen aus dem Metall ausreicht. Die Feldverhältnisse an der Kathode können dabei völlig umgebildet werden, sodaß die Mehrzahl der erzeugten Elektronen auf die Wand fällt. Es wird dann viel Gas frei gemacht, und eine normale Gasentladung setzt ein. Das erste Anwachsen der Stromstärke, bedingt durch die Elektronenverschiebung an der Wand, erfolgt mit ähnlicher Schnelligkeit wie der Durchbruch einer Kugelfunkenstrecke in Luft. Die Beob-

achtungen, die über das Verhalten von Röhren mit Wandbegrenzung gemacht wurden, scheinen mit den im Vorstehenden geschilderten Anschauungen in Einklang zu stehen.

Folgende 4 Punkte sind für die Charakterisierung des Wandeffektes wesentlich:

1. Abhängigkeit der Spannungsgrenze vom Entgasungszustand der Wand.
2. Abhängigkeit der Spannungsgrenze von der höchsten lokalen Feldstärke an der Wand.
3. Das Auftreten von Gleitfunken auf der Außenseite bei Entladungen im Innern.
4. Die Möglichkeit, die Spannungsgrenze durch geeignete Maßnahmen an der Wand heraufzusetzen.

Dazu ist zu bemerken:

Zu 1: Aehnlich, wie beim normalen Gasdurchschlag die Spannung vom Druck abhängt, wird hier die kritische Feldstärke um so größer sein, je fester die Bindung der Oberflächenschicht ist. Bei zunehmender Entgasung bleiben nur die Atome übrig, die am festesten gebunden sind und am dichtesten gepackt liegen, zuletzt in monomolekularer Schicht. Bei völliger Entfernung aller Gasreste setzt eine Stoßionisation in der obersten Schicht des Isolators selbst ein. Man beobachtet nämlich eine starke Abhängigkeit der Spannungsgrenze vom Material der Wand, die bei schlechter Entgasung nicht vorhanden ist. Sehr auffällig ist bei den extrem entgasten technischen Röhren z. B. der Unterschied in der Spannungsfestigkeit von Röhren mit Hartglaskolben gegenüber solchen aus Weichglas. Bei Versuchsröhren, die nicht ausgeheizt werden konnten, machte sich dagegen ein Einfluß des Wandmaterials überhaupt nicht bemerkbar.

Zu 2: Ganz allgemein wird die Spannungsgrenze herabgesetzt durch Verkleinerung des Innendurchmessers der Röhre. Fig. 15 zeigt schematisch den Verlauf der elektrischen Kraftlinien bei einer Röhre

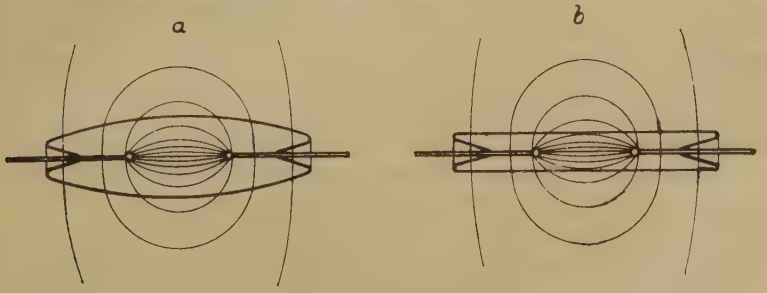

Fig. 15

Schema des Kraftlinienverlaufs in Röhren mit eingeführten Elektroden. Bei einer engen Röhre b ist die Kraftliniendichte an der Glaswand größer als bei einer weiten a.

mit eingeführten Elektroden, Fig. 16 bei einer Röhre mit Elektroden an den Enden. Man erkennt, wie eine Verkleinerung der Rohrweite von a auf b die Feldstärke gerade an den Stellen ihres größten Wertes vergrößert, bei Fig. 15 im mittleren Teil, bei Fig. 16 an den Enden. Es

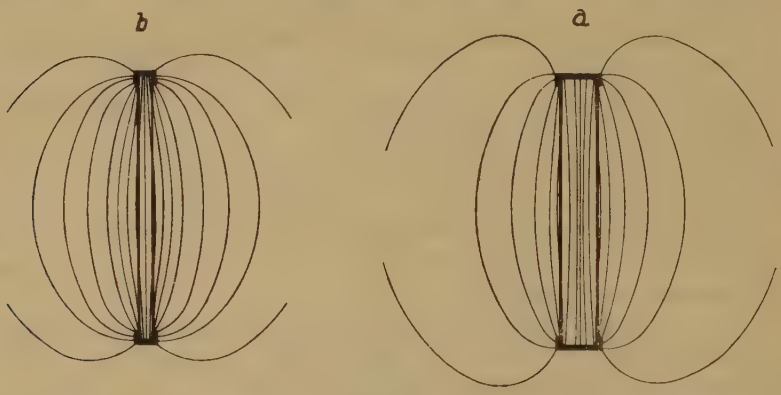

Fig. 16
Schema des Kraftlinienverlaufs bei einer Röhre mit Elektroden an den Enden. Auch hier wird die Feldstärke in der Nähe der Elektroden größer bei einer engen Röhre b als bei einer weiten a.

erscheint auch verständlich, daß eine Verlängerung der Röhre über eine gewisse Länge hinaus ohne gleichzeitige Vergrößerung des Durchmessers keinen Vorteil mehr bringt, da ja die max. Feldstärke sich einem konstanten Wert bei unendlichem Abstand nähert. Ferner wurde schon lange beobachtet, daß eine Verlängerung der sogen. Hälse bei technischen Röhren, d. h. der Teile, die die Einführung der Elektroden gemäß Fig. 15 umgeben, keine weitere Erhöhung der Spannung möglich macht. Es erscheint aus Fig. 15 ohne weiteres klar, daß hierbei der mittlere Teil, an dem die größte Feldstärke herrscht und der ja unverändert bleibt, für die Spannungsbegrenzung maßgebend ist.

Zu 3: In dem Augenblick, in dem die Spannung wegen Wandentladung zusammenbricht, werden häufig Gleitfunken beobachtet. Diese erstrecken sich über Längen, die mitunter ein Vielfaches von der normalen Funkenlänge bei der herrschenden Spannung betragen. Ohne das Vorhandensein des Vakuumraums im Innern würde eine bedeutend höhere Potentialdifferenz gehalten werden können. Dies spricht dafür, daß an der Innenseite hohe, nach der geschilderten Vorstellung positive, Wandladungen vorhanden sind, die in derselben Weise Gleitfunken hervorrufen, wie bei einer Platte mit rückseitigem Metallbelag und zwar um so leichter, je geringer die Wandstärke ist. Das wird auch beobachtet, außerdem eine Neigung zu Querdurchschlägen, die keineswegs in der Richtung der normalen Feldstärke erfolgen. Solche Wanddurchschläge traten schon bei den Versuchen von Brasch und Lange auf, ohne daß zunächst eine befriedigende Erklärung dafür gegeben werden

konnte. Es zeigte sich auch, daß diese Art von Gleitfunken stets auf der Seite des negativen Pols auftritt, obwohl z. B. bei einseitiger Isolierung des positiven Pols gegen Erde die unverzerrte Feldstärke an der Anode viel höher ist. Das ist dadurch besonders gut zu erkennen, daß die Gleitfunken häufig nur bis zur Mitte der Röhre laufen und sich dort in viele kleine Aeste auflösen, ohne die Anode zu erreichen. Bei Umpolung der Hochspannung tritt die Erscheinung sofort an der anderen Elektrode auf. Die Vorstellung von der Wandentladung fordert ja auch eine hohe Feldstärke an der Kathodenseite am Anfang der Raumladungsfäden, nicht jedoch nach der Anode zu, wo die Elektronenlawinen sich ausbreiten und schließlich von der Wand fort zur Anode gestreut werden. Nicht damit zu verwechseln sind die Gleitfunken, die bei Röntgenröhren mit Glühkathode auf der Anodenseite auftreten. Sie werden im Gegenteil durch negative Wandladungen hervorgerufen, die ihre Ursache in der Reflexion der Nutzelektronen an der Antikathode haben.

Zu 4: Es gelingt bekanntlich, durch gewisse Maßnahmen die Wandentladung zu verhindern bzw. stark hinauszuschieben. Ihre Wirkung besteht darin, daß einerseits die Potentialdifferenz durch geeignete Metallkörper so unterteilt wird, daß nirgends der kritische Wert der Feldstärke überschritten wird und daß andererseits eine Weiterentwicklung einmal begonnener Elektronenlawinen verhindert wird. Das letztere kann man auch erreichen, indem man der Wand ein solches Profil gibt, daß Zonen maximaler Tangentialfeldstärke stets mit Zonen geringer oder gar entgegengesetzter Feldstärke abwechseln. Beide Wirkungen werden erzielt durch die Einführung von Metallringen oder Metallscheiben. An ihnen stellt sich besonders bei kurzseitiger Stoßbelastung oder Wechselspannung eine kapazitive Verteilung der Spannung ein. Ferner verlieren die Elektronen bei der Aufladung der Metallteile ihre Geschwindigkeit, und die Feldstärke wird so umgebildet, daß die Raumladungsfäden am Metall enden, sodaß sich immer wieder neue Köpfe von Entladungsfäden bilden müßten. Besonders elegant werden alle Forderungen nach Unterdrückung der Wandentladung erfüllt durch das Lamellenrohr von Brasch und Lange, bei dem sowohl eine große Kapazität der Einzelscheiben bei sehr feiner Unterteilung vorhanden ist als auch ein Wandprofil mit langen Wegen der Feldstärke Null und eine fast vollständige Abschirmung der Isolierteile gegen Aufprall von Ladungsträgern. Hier ist es wohl kaum mehr möglich, überhaupt Wandentladungen zu erzeugen.

Für meine Versuche kamen nur Röhren in Frage, bei denen die Spannungsgrenze noch durch die zur Verfügung stehende Anlage erreicht werden konnte unter Ausschluß von Elektrodenentladungen. Um den von der Wand herrührenden Effekt möglichst rein zu beobachten, ist es zweckmäßig, die Versuche mit engen langen Röhren anzustellen, bei denen die Elektroden an den Enden sitzen. Man kann so die Feldstärke an den Elektroden leicht verhältnismäßig klein halten und kann

erreichen, daß sehr wenig Elektrizitätsträger von der einen Elektrode zur anderen durch den freien Raum gelangen können. So wurden zylindrische Porzellan- oder Glasröhrchen von ca. 60—150 cm Länge untersucht. In dem Innenraum befanden sich offene Nickelringe, die federnd an der Wand anlagen, wie bei Brasch und Lange. An den Enden der meist verwendeten Porzellanröhren (Fig. 17) befanden sich

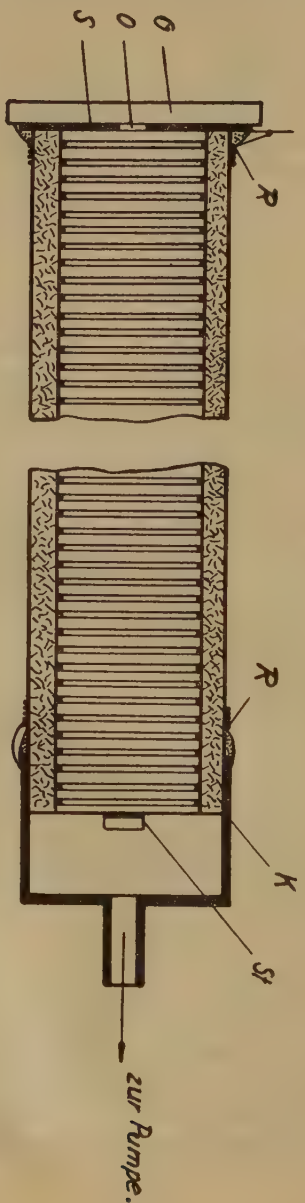

Fig. 17

Skizze der meist verwendeten Porzellanröhren. K = Kappe, St = Metallsteg gegen Eindringen von Elektronen in die Pumpleitung, G = Glasfenster mit Oeffnung O in der Elektrode S. R = mit den Elektroden verbundene Schutzringe zur Feldbeeinflussung und als Ansatz für Gleitfunken, die bei Nichtvorhandensein das Picein zersplittern.

Messingkappen K bzw. Scheiben S mit einer Oeffnung O, die mit Picein aufgekittet waren. Die Kappe hatte einen Rohransatz, der zum Ausfriergefäß und zur Pumpe führte. Ein Messingsteg St verhinderte, daß Elektronen oder Ionen in die Pumpleitung flogen und dort Durchschläge verursachten. Die andere Elektrode war durch ein Glasfenster G abgeschlossen, durch das der Zustand des Rohrs beobachtet wurde. Um die Kittstellen gegen Durchschläge zu schützen und vor allem, um die Stelle größter Feldstärke von den Elektroden fort zu verlegen, wurden außen Schutzringe R vorgesehen, die mit den Elektroden verbunden waren.

Solche Röhren wurden bei gutem Vakuum an Stoßspannung, an pulsierende Gleichspannung und Wechslspannung gelegt. Um den Vergleich der verschiedenen Röhren mit und ohne Ringen durchführen zu können, wurde die Spannung langsam gesteigert, bis Spannungszusam-

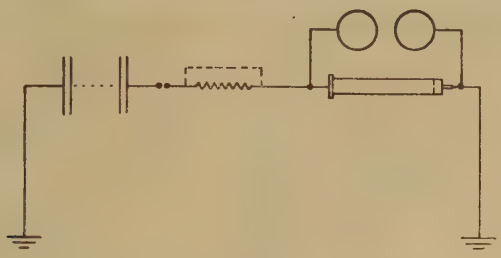

Fig. 18

Schaltung bei der Röhrenuntersuchung. Paralles zum Rohr liegt die Meßfunkenstrecke Die Spannung wird über eine Vorschaltfunkenstrecke zur Abhaltung der Gleichspannung und über einen evtl. kurz geschlossenen Vorwiderstand dem Rohr zugeführt.

menbruch unter Leuchterscheinung eintrat. Man konnte dann im allgemeinen eine Verschlechterung des Vakuums feststellen, die nach kurzer Zeit durch die Pumpe wieder behoben war. Dann wurde die Spannung erneut gesteigert und ließ sich im allgemeinen höher hinauftreiben als vorher. Das wurde so oft wiederholt, bis weiteres Pumpen und vorsichtige Spannungssteigerung keine Fortschritte mehr erreichen ließen oder bis in einzelnen Fällen starke Gleitfunken die Röhre gefährdeten. Dies wurde als Grenze für die betreffenden Röhren angesprochen, die im allgemeinen gut reproduzierbar war. Dagegen war der Spannungswert beim ersten Zusammenbruch eines Rohres sehr unregelmäßig.

Die Stoßanlage von 3000 cm, später 1500 cm Kapazität, die für diese Versuche benutzt wurde, liefert einen Spannungsstoß von 5,8 bzw. $2{,}9 \cdot 10^{-4}$ sec., dem eine kürzere Ueberspannung überlagert ist, wie das im Abschnitt Ueberspannung gezeigt wurde. Die Spannung wurde parallel zur Röhre mit einer 100 cm-Kugelfunkenstrecke gemessen. In einzelnen Fällen lag zwischen dem Pol der Stoßanlage einerseits und der Röhre und Funkenstrecke andererseits ein Widerstand, der die Ueberspannung beseitigte (Fig. 18). Zum Vergleich der verschiedenen

Tabelle II

Länge der Röhre in cm			$kV_{max.}$	kV_{Anfang}	kV_{gut}	
a	135	mit Ringen	+715 o.W.	+520 o.W.	+700 o.W. −600	Messingmittelstück
a	135	„ „	> 300 ~		> 300 ~	„
a	135	„ „	> 340 ≃		> 340 ≃	„
a	135	ohne Ringe, nicht geätzt	> 340 ≃	260	> 340 ≃	„
a	135	„ „	> 730 o.W.	360 o.W.	730 o.W.	„
a/2	61	ohne Ringe, nicht geätzt	510 o.W.	360 o.W.	− 510+440 o.W. ± 320 m.W.	Eine Hälfte v. Rohr a wurde entfernt
„	61	„ „	277 ~	211 ~		
„	61	„ „	> 335 ≃		> 335 ≃	
„	61	mit Ringen	370 m.W.	300 m.W.		
„	61	„ „	+510 o.W.	370 o.W.	+510 o.W.	
„	61	„ „	273 ~	255 ~		
b	150	mit Ringen	410 m.W.	+240 m.W.	410 m.W.	Glasrohr 30 mm ∅
b	150	„ „	> 300 ≃		> 300 ≃	„ 30 mm ∅
b	150	„ „	> 300 ~		> 300 ~	„ 30 mm ∅
b	150	„ „	750 o.W.	520 o.W.	720 o.W.	„ 30 mm ∅ Durchschlag
c	150	ohne Ringe, neu	275 ≃	85 ≃		Glasrohr 30 mm ∅ Durchschlag
d	150	„ „	240 m.W.	< 220 m.W.		Glasrohr 30 mm ∅ Durchschlag
e	90	mit Ringen, neu	400 o.W.	< 330 o.W.		Eng. Porzellanrohr innen ∅ 21 mm Durchschlag
f	128	ohne Ringe, neu	250 m.W.	< 120 m.W.		
f	128	mit Ringen	> 525 m.W.		> 525 m.W.	
f	128	„ „	> 1000 o.W.	830 o.W.	> 1000 o.W.	
f	128	ohne Ringe, nicht geätzt	875 o.W.	< 330 o.W.		Durchschlag

	Länge der Röhre in cm		$kV_{max.}$	kV_{Anfang}	kV_{gut}	
I	95	ohne Ringe, neu	< 330 o.W.	< 330 o.W.		
I	95	„ „	< 210 m.W.	< 210 m.W.		
II	95	„ „	< 250 m.W.	< 250 m.W.		
III	95	„ „	< 330 o.W.	< 330 o.W.		
I	95	mit Ringen	> 810 o.W.	565 o.W.	> 810 o.W.	
I	95	ohne Ringe, nicht geätzt	< 250 m.W.	< 250 m.W.		
II	95	mit Ringen	780 o.W.	725 o.W.	760 o.W.	
II	95	ohne Ringe, nicht geätzt	360 m.W.	< 250 m.W.		
III	95	mit Ringen	790 o.W.	590 o.W.	790 o.W.	
I	95	ohne Ringe, nachgeätzt	260 m.W.	< 250 m.W.		
I	95	mit Ringen	800 o.W.	< 330 o.W.	800 o.W.	Zum 2. Mal mit Ringen versehen
III	95	ohne Ringe, nicht geätzt	630 o.W.	< 330 o.W.		
II	95	ohne Ringe, nachgeätzt	< 330 o.W.	< 330 o.W.		

$kV_{max.}$ = höchste erreichte Spannung in kV

kV_{Anfang} = niedrigste Spannung, bei der Leuchten beobachtet wurde

kV_{gut} = höchste Spannung, bei der das Rohr längere Zeit dunkel blieb

o.W. = ohne Vorwiderstand } Stoßspannung
m.W. = mit Vorwiderstand }

$\sim$ = 50 $\sim$ Wechselspannung

$\simeq$ = pulsierende Gleichspannung

< = niedrigere Spannung ließ sich mit der Stoßanlage nicht erzeugen

> = eine weitere Erhöhung der Spannung ließ die Apparatur nicht zu.

Röhren wurde in Tab. III die Spannung stets umgerechnet auf den Fall ohne Vorwiderstand. Frühere Versuche hatten nämlich gezeigt, daß für diese Art von Röhren das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein des Widerstandes ohne Einfluß auf die maximal erreichbare Nutzspannung ist. Er wurde deshalb in einzelnen Fällen angewendet, um die Röhre gegen allzu starke Entladungen zu schützen, bei denen an der Anode das Picein schmolz und Durchschläge eintraten. Die Umrechnung erfolgte auf Grund von Messungen mit der Kugelfunkenstrecke parallel zur Röhre (Fig. 18).

Es wurden 10 verschiedene Röhren untersucht, sämtliche an Stoßspannung, einige auch an 50 Perioden Wechselspannung, die uns bis zur Höhe von 300 kV Scheitelwert zur Verfügung stand, und an pulsierender Gleichspannung, die von einer Villard-Apparatur bis ca. 340 kV geliefert wurde. Tab. II zeigt die mit dieser Art Röhren ausgeführten Untersuchungen. Die Röhre a bestand aus 2 Porzellanröhren, die durch ein Messingzwischenstück zusammengekittet waren, jedoch so, daß der Entladungskanal nicht in Berührung mit Picein kam. a/2 war das eine der beiden Teilrohre allein. Die Röhren b, c, d waren Glasröhren aus Hartglas von ca. 30 mm ∅ und üblicher geringer Wandstärke. Diese Röhren allein konnten unter Vermeidung von Kittungen an die Hochvakuumapparatur angeschmolzen werden (Fig. 19). Die Ver-

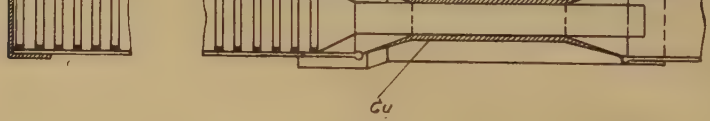

Fig. 19

Ringröhren aus Glas. Die Hochspannungselektrode ist eine übergreifende Metallkappe. Die Verbindung zur Pumpe geschieht der verschiedenen Glaszusammensetzung wegen über das Kupferrohr Cu und die Anglasungen G. Als Schutz für diese und als Erdanschluß dienen die inneren und äußeren Zylinder Z. Da die Ränder der kleinen Kappe stark sprühen, wird die Feldstärke gleichmäßiger ausgebildet. Die im Text beschriebenen Gleiterscheinungen im Inneren spielen sich zwischen den letzten Ringen in der Nähe dieser Kappe ab, doch ohne mit dieser in Verbindung zu stehen.

bindung geschah durch ein Kupferrohr Cu, dessen Anglasungen G dadurch gegen jedes elektrische Feld geschützt wurden, daß sie durch außen und innen überstehende Metallzylinder Z abgedeckt wurden. Das Rohr e war ein Porzellanrohr geringen Durchmessers, jedoch großer Wandstärke, um den Einfluß der lichten Weite zu klären. Die übrigen Röhren f, I, II, III waren Porzellanröhren, wie auch a und a/2, von 80 mm Innendurchmesser und 25 mm Wandstärke mit Elektroden nach Fig. 17.

Als die ersten Versuche mit dem Rohr a mit den eingesetzten Ni-Ringen gemacht wurden, zeigte es eine Spannungsfestigkeit, die weitaus größer war als man bei ähnlichen Röhren ohne Ringe gewohnt ist. Unterhalb 500 kV war es vollkommen dunkel, und nach einigem Betreiben blieb es bis oberhalb 700 kV entladungsfrei, es vertrug auch die höchst vorhandene Wechselspannung und Gleichspannung von 300 bzw. 340 kV. Als jedoch die Ringe entfernt wurden, zeigte sich das Rohr nicht im geringsten verändert, wenn man davon absieht, daß es vielleicht gegenüber Gleichspannung etwas empfindlicher war. Genau so war auch bei dem Rohr a/2 ein Einfluß der Ringe nicht zu erkennen.

Da aber die Tatsache besteht, daß so hohe Spannungen mit nicht ausgeheizten, gekitteten Röhren sonst nie erreicht werden konnten, bestand die Vermutung, daß die Ringe auch nach ihrer Entfernung noch einen Einfluß auf das Verhalten gegenüber Hochspannung haben müßten. Bei späteren Versuchen wurde daher darauf geachtet, die Röhren vor ihrer ersten Besetzung mit Ringen mit Stoßspannung zu untersuchen, außerdem auf eine absolute Gleichheit der Bedingungen bei den Kontrollversuchen. Es wurden stets dieselben Elektroden benutzt, dieselbe Vakuumapparatur, dieselbe Lage der Röhren im Raum. Die Röhren wurden von nun an stets mittels Uebermangansäure gereinigt. Diese Behandlung, die zwar wegen der benötigten großen Mengen gefährlich für den Ausführenden ist, aber äußerst wirksam in der Beseitigung aller organischen und metallischen Verunreinigungen der Porzellaninnenfläche, wurde vor jedem Versuch wiederholt, außer, wenn der nachwirkende Einfluß der Ringe nachgewiesen werden sollte.

Die neuen Röhren zeigten jetzt schon bei der niedrigsten Spannung, die unsere Stoßapparatur erzeugen konnte, heftige Entladungen unter lebhaftem Leuchten, vielfach auch Gleitfunken über die ganze Länge der Röhre bis 128 cm. Diese Spannung von etwa 330 kV, die aber häufig garnicht erreicht wurde, weil bei den Röhren Spannungszusammenbruch eintrat, konnte auch nach vielen Entladungen und langen Pausen bei bestem Vakuum niemals gesteigert werden. Aehnlich verhielten sich auch die Röhren, die nach dem Entfernen der Ringe erneut mit Uebermangansäure geätzt worden waren. Dagegen konnte bei allen Röhren mit Ringen, mit Ausnahme der Röhre e, eine Spannung von 750 kV angelegt werden, ohne daß die geringste Entladung eintrat, wenn die Röhren genügend lange durch Entladungen gereinigt waren. Eine Zusammenstellung der Ergebnisse zeigt Tab. III. Bei der längsten

Tabelle III

Röhre:	a	a/2	b*	d*	f	I	II	III	I*
Röhre neu, geätzt				< 330	< 330	< 330	< 330	< 330	
mit Ringen, geätzt	715	510	750		1000	810	780	790	800
Ringe entfernt, nicht geätzt	(730)	(500)			(875)	(< 330)	(500)	(630)	
nachgeätzt						330 < 330			

* mit Flußsäure geätzt
sämtliche Werte Stoßspannung in kV ohne Vorwiderstand.

Porzellanröhre (128 cm) wurde eine Million Volt erreicht, wobei sich durch das Glasfenster kein Leuchten zeigte. Die Beobachtung erfolgte durch einen isoliert aufgestellten Spiegel, durch ein geerdetes Schutzgitter (s. Fig. 20). Derselbe spannungsfeste Zustand konnte auch bei

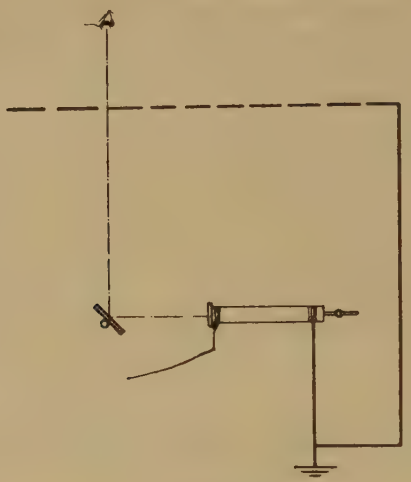

Fig. 20

Die Beobachtung durch das Glasfenster der Porzellanröhren, das sich auf der Hochspannungsseite befand, erfolgte aus größtmöglichster Nähe über einen Spiegel durch ein geerdetes Schutzgitter.

der einzigen Glasröhre mit Ringen, deren Herstellung gelang, der Röhre b, erreicht werden. Die Schwierigkeit hierbei liegt darin, daß die Ringe beim Hineinschieben die Glasoberfläche irgendwo ritzen, sodaß immer Sprünge auftreten und das Rohr in Stücke zerfällt. Hier beobachtete man bei der allmählichen Steigerung der Spannung, daß zwischen einzelnen benachbarten Ringen in der Nähe des gegen Erde isolierten Poles, also da, wo die größte Feldstärke herrscht, leuchtende, funkenähnliche Bahnen erscheinen. Mit höherer Spannung treten diese Leuchtbahnen immer häufiger auf, an zwei verschiedenen Stellen des Rohres gleichzeitig, in größerer Anzahl zwischen zwei Ringen, und schließlich laufen sie über mehrere Ringe hinweg, um dann plötzlich in die Entladung umzuschlagen, die durch die ganze Länge des Rohres geht. Durch schräge Beobachtung mittels Spiegel erkennt man, daß die Erscheinung sich wirklich an der Wand, nicht im freien Raum, abspielt und daß die Ringe eine vollkommene Abschneidung bewirken. Man kann also die Spuren der Elektronenbahnen und die Wirkung der Ringe direkt sehen. Es wird so auch deutlich, daß die Ringe nicht nur durch ihre kapazitive Spannungsteilung wirksam sind. Glasröhren ohne Ringe pflegen aber bei der geringsten Spannung durchzuschlagen, da die Entladungen so starke Querfelder erzeugen, daß die dünne Wandstärke

ihnen nicht gewachsen ist. Das Rohr e fand seine Grenze schon bei einer Spannung von 400 kV, wie das bei dem kleinen Innendurchmesser von 21 mm auch zu erwarten war (s. auch weiter unten). Am wenigsten reproduzierbar ist die Maximalspannung für die Röhren, die nach Entfernung der Ringe ohne Nachätzung wieder betrieben wurden. Man erkennt aber aus Tab. III deutlich, daß ein Einfluß der Ringe nach ihrer Entfernung noch vorhanden ist und daß er verschwindet, wenn die Röhren geätzt werden. Es ist wohl anzunehmen, daß es sich dabei um zerstäubtes Metall oder Aetzrückstände unter den Ringen handelt.

Die Wirkung der Metallringe entspricht der Vorstellung, die vorher beschrieben wurde. Da durch sie eine lokale Feldstärkenerhöhung irgendwo im mittleren Teil der Röhre verhindert wird, so ist die Spannung, die die Röhre verträgt, abhängig von der Feldstärke in der Umgebung der Elektroden. Bei größerem Abstand verringert sich diese um so stärker mit dem Abstand, je größer der Durchmesser der Elektoden und damit der Röhre ist. So verträgt das nur 3 cm dicke Rohr b trotz seiner großen Länge von 150 cm nur 750 kV, wogegen die Röhren I bis III bei nur 95 cm Länge etwa 800 kV aushalten, da sie 8 cm Weite haben. Das Rohr e mit nur etwa 2 cm Weite und 90 cm Länge schlug bereits bei 400 kV durch.

Die Feldstärke an den Elektroden war sehr klein, da ja die ganze Länge des Entladungsrohrs zwischen ihnen lag. Damit nicht an der Grenze von Metall und Porzellan eine zu hohe Feldstärke auftreten konnte, wurden die Kappen so ausgebildet, daß sie außen überlappten (Fig. 17 Schutzringe und Fig. 19). Es wurde dadurch erreicht, daß die größte Feldstärke am Porzellan dicht an den Elektroden, aber nicht am Metall selbst entsteht, sodaß man hier den Wandeffekt in seiner reinen Form beobachten konnte.

Zusammenfassung der Ergebnisse.

Es sollte versucht werden, die Frage des Arbeitens von Hochvakuumröhren bei hohen Spannungen zu klären. Zur Durchführung der Versuche wurde eine Stoßanlage für 1,4 Millionen Volt Spannung gebaut.

Es wurde ein Aufbau in engem Raum ermöglicht durch Verwendung von isolierenden Seilen und Druckfunkenstrecken. Es gelang, 240 kV in Druckfunkenstrecken zu halten, jedoch nur in relativ weiten Gehäusen, da der Gleitweg nicht beliebig durch höheren Druck herabgesetzt werden konnte. Die Zündspannung der Druckfunkenstrecken zeigte sich sehr unreproduzierbar, sodaß ihre Verwendung nur in bestimmten Grenzen unter Vorschaltung einer offenen Zündfunkenstrecke möglich ist.

Es wurde gefunden, daß der Stoßspannung eine kurze dauernde Ueberspannung überlagert ist, die keine Kathodenstrahlenenergie erzeugt und den Röhren schadet. Ihre Messung wurde ohne Oszillographen durchgeführt und ein Weg zu ihrer Beseitigung angegeben.

Bei Versuchen mit Glasröntgenröhren stellte sich heraus, daß die üblichen Stoßanlagen mit großer Kapazität und langsamer Stoßfolge zum Betrieb von Röhren ungeeignet sind.

Verschiedene Versuchsanlagen wurden gebaut und speziell für den Röhrenbetrieb ausgebildet mit sehr schneller Stoßfolge im Dauerbetrieb und kleiner Kapazität bei großer Zeitkonstante. Messung und willkürliche Einstellung der Röhrenstromstärke und der Spannung im Betrieb ermöglichten eine Annäherung an den kontinuierlichen Betrieb und ließen Vorteile des Stoßbetriebes erkennen. Photographische Härtemessungen ergaben eine Abschätzung der dabei benötigten Spannungserhöhung zur Erreichung der gleichen Härte.

Ueberlegungen über die Abhängigkeit der Trägerbildung vom Gasdruck zeigen, daß für Entladungen über 50 kV und unter 10^{-3} mm Druck die alten Erklärungen versagen.

Es wird eine Hypothese der Auslösung positiver Ionen an der Anode durch den Aufprall von Elektronen aufgestellt, die die an den Elektroden sich abspielenden Vorgänge gut erklärt. Jedoch stößt die Erklärung der Potentialabhängigkeit und deren Verschiebbarkeit auf Schwierigkeiten. Es wird darauf hingewiesen, daß eventuell ein noch unbekannter Effekt eine Rolle spielen kann.

Die von Brasch und Lange aufgestellten Vorstellungen über die Wandentladung wurden genauer untersucht.

Bei gut entgasten Röhren zeigt sich ein Einfluß des Wandmaterials.

Der Einfluß verschiedener Röhrenformen und Durchmesser ergibt, daß tatsächlich die größte lokale Feldstärke für die Spannungsgrenze maßgebend ist.

Die Beobachtung von Gleitfunken läßt den Mechanismus der positiven Raumladungsfäden deutlich erkennen, der noch besonders durch das Verhalten von Glasröhren mit Ringen anschaulich gemacht wird.

Zum Vergleich verschiedener Röhren wurde die Spannungsgrenze durch die Art des Betreibens und durch Beobachtung der Leuchterscheinungen durch Glasfenster reproduzierbar festgelegt.

Die Wirkungslosigkeit der kurzzeitigen Ueberspannung gibt eine untere Grenze für die Aufbauzeit der Wandentladung. Die Nachwirkung von Metallringen nach ihrer Entfernung wird beobachtet, ist jedoch sehr unregelmäßig.

Die Arbeit wurde ausgeführt im Röntgenlaboratorium der Osram-Röhrenfabrik. Zu Dank verpflichtet bin ich des Osram-G. m. b. H., insbesondere Herrn Dir. Dr. Mey, ferner Herrn Dr. Lange vom Phys. Inst. der Universität Berlin für sein Interesse an der Arbeit und mancherlei Ratschläge.

Lebenslauf.

Ich, Kurt Fritz Karl Lenz, wurde geboren am 10. Juli 1908 in Berlin-Friedenau als Sohn des Oberregierungsrates Karl Lenz. Ich besuchte zwei Jahre die Vorschule, von Ostern 1917 bis 1926 das Realgymnasium Berlin-Lichterfelde. Vom Sommersemester 1926 an war ich 9 Semester immatrikuliert an der Universität Berlin. Ich widmete mich dem Studium der Physik, Chemie, Mathematik und Biologie, um später Physik als Hauptfach zu wählen. Von 1929 an arbeitete ich im physikalischen Institut der hiesigen Universität bei Herrn Dr. Lange, unter Prof. Nernst und Prof. Wehnelt, mußte aber krankheitshalber diese Tätigkeit im Herbst 1930 wieder aufgeben. Im März 1931 trat ich als Werkstudent in die Röhrenfabrik der Osram-Kommanditgesellschaft ein. Hier arbeitete ich im Röntgenlaboratorium unter Leitung von Herrn Dr. Traub bis zum Frühjahr 1934 an meiner Arbeit „Ueber das Problem des Entladungsrohres für sehr hohe Spannungen".

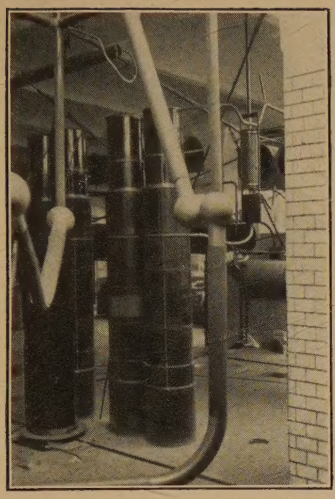

Bild 1

Die ersten beiden stehenden Stufen der großen Stoßanlage. Im Hintergrund oben die dritte, darunter die vierte Stufe, anschließend nach links die fünfte. Der Umschalter im Vordergrund erlaubt von der Ferne eine Umpolung der Gleichstromapparatur und ermöglicht so, nach Belieben von positiver zu negativer Stoßspannung gegen Erde überzugehen.

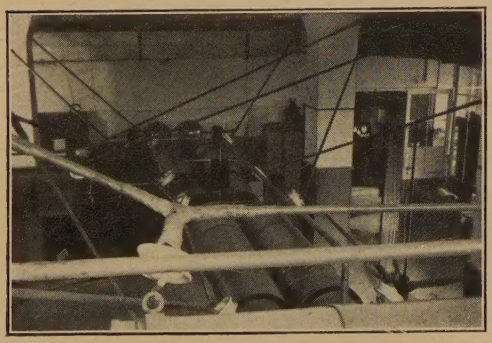

Bild 2

Ueberblick über die dritte (ganz im Vordergrund), fünfte, sechste und siebente Stufe der großen Stoßanlage. Das Bild zeigt die große Isolationslänge der Seile, die für die letzte Stufe ermöglicht wurde.

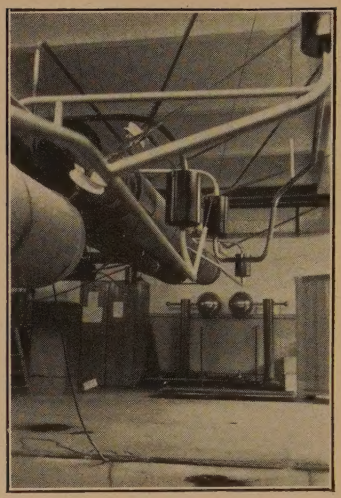

Bild 3

Die fünfte und sechste Stufe der großen Stoßanlage. Man erkennt die in den Leitungen hängenden Drosseln. Die vom Boden aufsteigende Leitung ist eine der Cellonröhren, die den Stickstoff zu den Druckfunkenstrecken leiten.

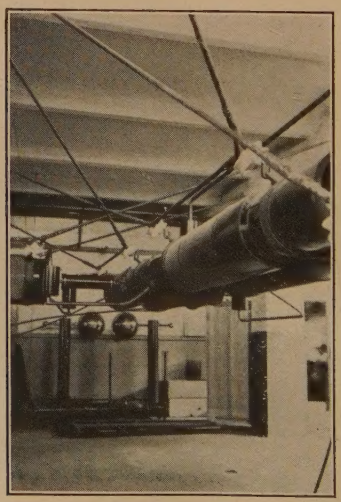

Bild 4

Die letzten drei Stufen der großen Stoßanlage. Die Art der Aufhängung ist gut zu erkennen. Der liegende glänzende Zylinder in der Bildmitte ist die letzte Druckfunkenstrecke. Im Hintergrund eine Funkenstrecke mit 50 cm Kugeln.

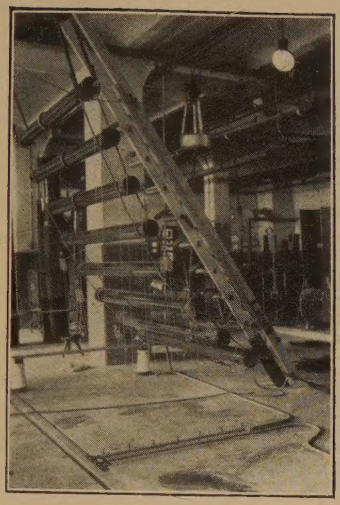

Bild 5
Die kleine Stoßanlage mit 8 Zylinderfunkenstrecken. Die einzelnen Kondensatoren konnten nicht untereinanderliegend angeordnet werden wegen zu geringer Raumhöhe. Sie bilden so eine Kettenlinie. Im Vordergrund die Widerstandskapillaren der geerdeten Seite. In der Mitte oben die Wasserkühlpumpe für die Spannungsseite.

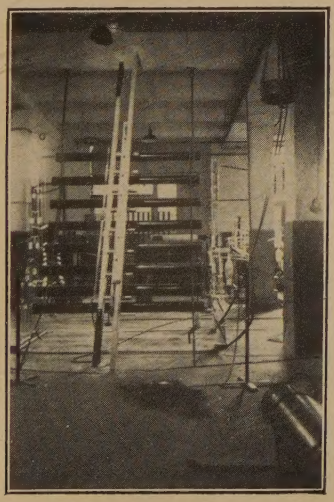

Bild 6
Gesamtblick über die kleine Stoßanlage. In der Mitte die Funkenstrecken, links die geerdeten, rechts die isolierten Widerstände. Rechts oben die Kühlpumpe. Im Hintergrund rechts die Pumpapparatur für Versuchsröhren, daneben eine Porzellanröhre.